

Pohjaveden hyödyntäminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestel- missä Suomessa

Lahden seudun alueellinen tarkastelu

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Energia- ja ympäristötekniikka
Energiatekniikka
Opinnäytetyö
Syksy 2017
Joonas Kouvo

Lahden ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka

KOUVO, JOONAS:

Pohjaveden hyödyntäminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä Suomessa
Lahden seudun alueellinen tarkastelu

Energiatekniikan opinnäytetyö, 72 sivua, 1 liitesivu

Syksy 2017

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä taustaselvitys pohjaveden hyödyntämismahdollisuuksista rakennusten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä Suomessa ja erityisesti Lahden seudulla. Työn tilaajana toimi Lahden ammattikorkeakoulun NETS-hanke, jonka tavoitteena oli suorittaa selvitystyö aiheesta Nastolanharjun yrityksille yhteistyössä Geologian tutkimuskeskuksen kanssa. Lopullisesta pohjavesimittauksiin ja alueellisiin hydrologisiin mallinnuksiin perustuvien laskelmien ja tulosten raportoinnista yrityksille vastasi Geologian tutkimuskeskus.

Työ toteutettiin kirjallisuusselvityksenä ja haastattelututkimuksena, jossa haastateltavana toimi Geologian tutkimuskeskuksen asiantuntija Teppo Arola. Selvitettäviä kokonaisuuksia olivat maaperä- ja pohjavesiolosuhteiden sekä maankäytön vaikutukset open-loop-järjestelmien tuotantopotentiaaliin, vertailu muihin lämpöpumppujärjestelmiin, tekniset vaatimukset lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä, passiivisen ja aktiivisen järjestelmän eroavaisuudet sekä ympäristövaikutusten arviointi.

Vuonna 2012 Lahden seudulla tehtyjen pohjaveden lämpötilamittauksien perusteella voidaan havaita selvästi kohonneita pohjaveden lämpötiloja rakennetuilla alueilla. Tämä kertaalleen rakennuksista ympäristöön johtunut lämpöenergia olisikin hyödynnettävissä pohjaveden lämmöntalteenottojärjestelmän avulla.

Ympäristövaikutusten selvitys perustui Hollannissa tehtyihin mittauksiin. Ympäristövaikutukset keskittyvät pohjaveden lämpötilan muutokseen ja tulosten perusteella esimerkiksi arseenin liikkuvuus ja pitoisuus pohjavedessä lisääntyivät pohjaveden lämpötilan noustessa. Geologiset olosuhteet ovat Suomessa kuitenkin erilaiset, joten tuloksia ei voida suoraan kopioida Hollannin olosuhteista. Tämän vuoksi mittaustuloksia tarvitaan myös Suomen olosuhteissa.

Asiasanat: ATES, avoin kierto, COP, EER, maalämpö, pohjavesi, lämpöpumppu, arseeni

Lahti University of Applied Sciences

Degree Programme in Energy and Environmental Technology

KOUVO, JOONAS:

Utilization of groundwater in heating
and cooling systems in Finland
Regional review of Lahti region

Bachelor's Thesis in Energy Engineering, 72 pages, 1 page of appendices

Autumn 2017

ABSTRACT

The purpose of the thesis was to analyze the possibilities to utilize groundwater in heating and cooling systems in Finland and especially in the Lahti region. The project was commissioned by the NETS project of Lahti University of Applied Sciences, which aimed to carry out a study for Nastolanharju's companies in co-operation with the Geological Survey of Finland. The Geological Survey of Finland was responsible for reporting the calculations and results of the final groundwater measurements and regional hydrological modeling.

The work was carried out as a literature review and an interview study, in which the interviewee was Teppo Arola, an expert at Geological Survey of Finland. The entities to be investigated were the effects of soil, groundwater conditions and land use on open-loop production potential, comparison with other heat pump systems, technical requirements for heating and cooling systems, differences in passive and active systems, and environmental impact assessment.

Determination of groundwater energy content in the Lahti region was made on the basis of the 2012 temperature measurements. Based on the measurements, there is a clear observation of the increased groundwater temperatures in cities and urban centers as a result of human activity. This thermal energy that has once leaked to the environment from the buildings could be utilized through the groundwater heat recovery system.

The environmental impact assessment was based on measurements made in the Netherlands. Based on the results, the mobility and concentration of arsenic in groundwater increased as the groundwater temperature increased. These results can not be directly exploited in Finland and more detailed research results are needed in Finnish conditions.

Key words: ATEs, open-loop, COP, EER, ground source heat, groundwater, heat pump, arsenic

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	GEOENERGIA	2
2.1	Maaperä lämpövarastona	3
2.2	Maanalaisen lämpövaraston lämpöenergiatase	4
3	POHJAVESIENERGIA JA MAALÄMPÖ	6
3.1	Suljettu kierto (Closed-loop)	6
3.2	Avoin kierto (Open-loop)	7
3.3	Akviferin lämpötilavaihtelut ja antoisuus	9
3.4	Pohjaveden energiasisältö	13
4	LÄMPÖPUMPUT POHJAVESIJÄRJESTELMÄSSÄ	15
4.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate	15
4.2	Lämpöpumpun hyötysuhde	16
4.3	Pohjaveden lämmitys- ja jäähdytysvaikutus lämpöpumppujärjestelmässä	19
5	JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT	22
5.1	Perinteiset jäähdytysratkaisut	22
5.2	Aktiivinen ja passiivinen jäähdytys	23
6	POHJAVESI ENERGIAVARASTONA	28
6.1	Passiivijärjestelmät ja lämpöenergian kausivarastointi	28
6.2	Aktiivisen pohjavesijärjestelmän ja ilmalämpöpumppujen vertailu	32
6.3	Aktiivisen pohjavesijärjestelmän ja maalämpöpumppujen vertailu	37
6.4	Mitsubishin testitulokset pohjavesijärjestelmälle	40
6.5	Open-loop-järjestelmän suunnittelu ja mitoitus	43
7	YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	50
7.1	Tutkimustuloksia Hollannista	51
7.2	Arseenipitoisuudet Lahdessa	53
7.3	Radon pohjavedessä ja sisäilmassa	56
8	TULOKSET	60
8.1	Pohjaveden lämpötilavaihtelut ja energiasisältö	60
8.2	Lämpöenergian kausivarastointi	61

8.3	Vertailu ilmalämpöpumppuihin	62
8.4	Vertailu maalämpöpumppuihin	63
8.5	Open-loop-järjestelmän suunnittelu ja mitoitus	65
8.6	Vertailevat testitulokset (Mitsubishi)	66
8.7	Ympäristövaikutukset	67
8.7.1	Arseeni	67
8.7.2	Radon	68
9	YHTEENVETO	71
	LÄHTEET	73
	LIITTEET	77

SANASTO

Aestifer	Maa- tai kallioperän osa, jolla on riittävä lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti lämpöenergian talteenottoa ja varastointia varten.
Akviferi	Pohjavesivarasto.
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage. Järjestelmä, jossa lämpöenergiaa varastoidaan pohjavesivarastoon.
Closed-loop	Ts. suljettu kierto. Tarkoitetaan perinteistä maalämpöjärjestelmää, jossa lämmönsiirtoneste kiertää suljetussa kierrossa lämmönkeruuputkiston tai lämpökaivon ja lämmöntalteenottojärjestelmän välillä.
COP _H	Lämpökerroin (Coefficient Of Performance). Arvo määrittää kertoimen, jolla kertomalla lämpöpumpun kuluttama sähköenergian määrä aikayksikköä kohden (sähköteho) saadaan lämpöpumpun lämmitysteho.
COP _C	Kylmäkerroin eli EER (Energy Efficiency Ratio). Arvo määrittää kertoimen, jolla kertomalla lämpöpumpun kuluttama sähköenergian määrä aikayksikköä kohden (sähköteho) saadaan teho, jolla lämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa ulos jäähdytettävästä tilasta.
EER	Energy Efficiency Ratio. Kts. COP _C .
Open-loop	Ts. avoin kierto. Tarkoitetaan pohjaveden lämmöntalteenottojärjestelmää, jossa lämmönsiirron väliaineena toimiva pohjavesi kiertää avointa kiertoa pohjavesivaraston ja lämmöntalteenottojärjestelmän välillä.
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio. Koko jäähdytyskauden kylmäkerrointa kuvaava arvo.
Tektoniset laatat	Ts. mannerlaatat. Laattojen rajavyöhykkeellä laatat voivat erkaantua tai työntyä toisiaan vasten. Molemmissa tilanteissa sula-aines pääsee purkautumaan litosfääristä pintakerrokseen.

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään pohjaveden hyödyntämismahdollisuuksista rakennusten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä Suomessa ja erityisesti Lahden seudulla. Työ on tehty osana taustaselvitystä Lahden ammattikorkeakoulun NETS-hankkeelle, jossa Nastolan Energiasäätiö, Lahden ammattikorkeakoulu ja nastolalaiset yritykset tutkivat erilaisia energiatehokkuuteen liittyviä ratkaisuja ja yhteistyömahdollisuuksia. Hankkeen päätavoite on edistää energia- ja materiaalisäästöä sekä uusiutuvien energialähteiden käyttöä. (Lahden ammattikorkeakoulu 2017.)

Suomen olosuhteissa tarkastelu keskittyy matalan lähdelämpötilan järjestelmiin, ei niinkään korkeiden lämpötilojen geotermisen energian hyödyntämiseen. Matalan lähdelämpötilan järjestelmillä tarkoitetaan tässä työssä järjestelmiä, joiden lämmönlähteenä toimiva maaperä tai pohjavesi on alle 40 °C:n lämpötilassa (Banks 2012, 2). Suomessa on arvioitu, että kaiken kaikkiaan pohjavesiin varastoitunutta lämpöenergiaa voitaisiin hyödyntää nykyaikaisten lämpöpumppujen avulla teoreettisesti kokonaislämmitysteholla 1040 MW (Arola 2012).

Huomioitavaa on, että lämmön pumppaaminen maaperästä on lähes päästötöntä. Päästöt syntyvät pumppujen ja kompressorien kuluttamasta sähköenergiasta ja sen tuotantomuodosta. Esimerkiksi aurinkoenergialla tai tuulivoimalla tuotetulla sähköllä toimivalla järjestelmällä ei olisi toiminnan aikaisia päästöjä. Ympäristövaikutukset ovat käytännössä riippuvaisia ympäristöön palautettavan veden lämpötilasta. Nykytiedon mukaan järjestelmästä palautettavan pohjaveden lämpötilan tulisi pysyä 25 °C:n alapuolella, jotta mikrobiologisia tai kemiallisia muutoksia ei tapahdu pohjavedessä (Arola 2017).

Työ toteutettiin pääasiallisesti kirjallisuusselvityksenä, jonka lisäksi työn aikana suoritettiin haastattelututkimusta. Haastateltavana toimi Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) asiantuntija Teppo Arola, ja hänelle esitetyt kysymykset ovat liitteessä 1.

2 GEOENERGIA

Geoenergiasta puhuttaessa tarkoitetaan kallioperän, maaperän, vesistön tai pohjaveden hyödyntämistä lämmitysjärjestelmän lämmönlähteenä ja jäähdytysjärjestelmän lämpönieluna. Usein geoenergia ja geoterminen energia yhdistetään samaksi käsitteeksi, mutta tässä työssä geoenergia on jaettu hyödyntämistavan mukaan kahteen pääryhmään: geotermisiin järjestelmiin ja matalan lähdelämpötilan järjestelmiin. Suomen olosuhteissa geoenergian hyödyntäminen keskittyy pääsääntöisesti matalan lähdelämpötilan järjestelmiin, ei niinkään geotermisen energian hyödyntämiseen. Erona on, että geotermisissä järjestelmissä hyödynnetään verrattain korkeita lämpötiloja, jolloin lämpöenergia on pääasiallisesti peräisin maan sisäkerroksista (Banks 2012, 11 - 12). Geotermisten järjestelmien suurin potentiaali onkin tektonisten laattojen rajavyöhykkeillä, joissa maan ytimessä syntyvä lämpö pääsee sulan aineksen mukana kulkeutumaan maan pintakerrokseen (Banks 2012, 19 - 20). Esimerkiksi Islannissa tätä on mahdollista hyödyntää suoraan sähköntuotannossa. Lämpö otetaan lämmönsiirtonesteen avulla talteen ja johdetaan lämmönvaihtimeen, jossa lämpö siirretään höyrystettävään työnesteeseen. Kuuma höyry johdetaan suoraan turbiineihin ja ylimääräinen lämpö voidaan johtaa rakennusten lämmitykseen, jonka jälkeen kierto alkaa alusta. (Banks 2012, 30 - 31.)

Matalan lähdelämpötilan järjestelmillä tarkoitetaan tässä työssä järjestelmiä, joissa lämmönlähteenä toimiva maaperä tai pohjavesi on alle 40 °C:n lämpötilassa (Banks 2012, 2). Matalista lämpötiloista huolimatta potentiaalinen lämmitysteho pohjavesijärjestelmillä on huomattava ja Suomessa on arvioitu, että nykyaikaisella lämpöpumpulla ($COP_H = 4$) olisi hyödynnettävissä oleva teoreettinen kokonaislämmitysteho tällä hetkellä noin 1040 MW (Arola 2012). Arvio perustuu oletukseen, että pohjaveden lämpötilan muutos lämmöntalteenotossa on 3 °C eli alueellisesti potentiaali voisi olla myös hieman suurempi. Toimiessaan tunnin tällä lämmitysteholla olisi asennettujen järjestelmien tuottama lämpöenergiamäärä 1040 MWh. Tämä vastaa lämpöenergiamäärää, joka vapautuu 87 tonnista poltettua fossiilista kevyttä polttoöljyä (lämpöarvo 43 MJ/kg) (MAOL 2006, 85).

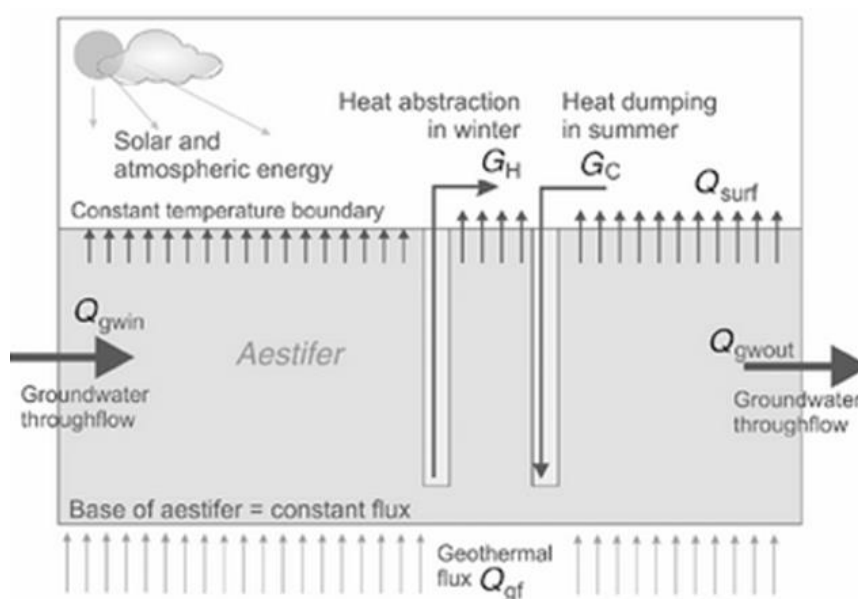
2.1 Maaperä lämpövarastona

Maan pintakerrokset toimivat isona lämpöä varastoivana elementtinä samaan tapaan kuin esimerkiksi omakotitalon varaava takka. Kyseessä on kasa tiiliä, jotka lämmitetään polttamalla puita ja vapauttamalla näin niihin varastoitunutta energiaa. Suurin osa energiasta muuttuu lämmöksi, joka varastoituu edelleen niiden päällä olevaan tiilikasaan. Tiilet ovat hyviä tähän tarkoitukseen, koska silikaattipohjaisilla materiaaleilla on sekä hyvä lämmön varastointikyky, että melko alhainen lämmönjohtavuus. Tämän vuoksi lämpö vapautuu tiilistä vähitellen ja pitää talon lämpimänä läpi päivän. Useimmat kivet ovat silikaattipohjaisia, kuten tiiletkin, ja niillä on täten hyvät lämmön varastointiominaisuudet. (Banks 2012, 40 - 41.) Lämmönjohtavuus taas kulkee käsi kädessä kiven kvartsipitoisuuden kanssa. Kvartsi on mineraali, jolla on todella korkea lämmönjohtavuus (7,7-7,8 W/m*K) (Banks 2012, 43). Mitä suurempi on kvartsimineraalin osuus kivilajista, sitä parempi lämmönjohtavuus (Arola 2017).

Aurinko lämmittää läpi kesän maa-ainesta, josta lämpö vapautuu vähitellen ilman lämpötilan laskiessa. Tämä sama voidaan toistaa myös lämpöpumpuilla. Käytännössä ylimääräinen lämpö pumpataan maaperään varastoitavaksi ja pumpataan takaisin käyttöön, kun lämmitystä tarvitaan. Sama toimii myös, jos käytettävissä on pohjavesivarastoja lämmönvarastointiin. Tällöin puhutaan ATES-järjestelmästä (Aquifer Thermal Energy Storage) ja ihannetapauksessa käytettävissä on erilliset kylmä- ja lämminvesivarastot. Kesäaikaan voidaan jäähdyttää rakennus kylmävaraston vedellä ja johtaa lämmennyt vesi lämminvarastoon. Lämmityskaudella kierto on päinvastainen eli rakennus voidaan lämmittää varastoidun lämpimän veden avulla, joka johdetaan jäähtyneenä takaisin kylmävarastoon. (Banks 2012, 72 - 76.) Tämä edellyttää pohjaveden alhaista virtaamaa, jotta varastoitu lämpö ei siirry sen mukana muualle ympäristöön (Sakai, Cui, Fuchimoto, Tsuji & Ueda 2017).

2.2 Maanalaisen lämpövaraston lämpöenergiatase

Kuviossa 1 on esitetty maanalaisen kerroksen osa, joka toimii lämpövarastona (Aestifer) (Banks 2012, 70). Mukana on aina luonnolliset tekijät, jotka vaikuttavat maaperän lämpöenergiataseeseen. Maaperään varastoituu aurion säteilyenergiaa lämpönä, mutta samalla lämpöä siirtyy johtumalla ja säteilemällä ympäristöön. (Banks 2012, 70 - 71.) Nämä kaikki tekijät tulee ottaa huomioon luodessa teoreettista mallia maaperän kokonaisenergiataseesta, jonka avulla voidaan arvioida maaperään varastoituvaa ja hyödynnettävissä olevaa energiamäärää.



KUVIO 1. Maanalainen lämpövarasto (aestifer) ja sen lämpöenergiataseeseen vaikuttavat tekijät (Banks 2012, 71)

Lisäksi maaperään ja pohjaveteen siirtyy lämpöenergiaa jatkuvan lämpövuon vaikutuksesta. Toisaalta virtaava pohjavesi kuljettaa mukanaan tietyn lämpömäärän kuutiota kohden, jota voidaan pitkällä aikavälillä pitää vakiona. (Banks 2012, 71.) Perinteisessä maalämpöjärjestelmässä ja pohjavesijärjestelmässä energiataseeseen vaikuttavat tekijät ovat erilaisia. Järjestelmien teknisten ominaisuuksien eroavaisuudet on esitetty luvussa 3. Maalämpöjärjestelmässä energiataseeseen avulla voidaan määritellä maa- tai kallioperästä pumpattavan lämpömäärän raja, jolla maalämpökaivon lämpötilat kykenevät palautumaan pumppauksesta luonnollisten lämpövirtojen

vaikutuksesta. Jos lämpökaivoon varastoituva lämpömäärä Q_{in} on yhtä suuri kuin lämpökaivosta poistuva lämpömäärä Q_{out} eli $Q_{in} = Q_{out}$, pysyy lämpövaraston lämpötila vakiona. Jos taas lämpövarastosta poistuva lämpömäärä on suurempi kuin siihen absorboituva lämpömäärä, alkaa se jäähtyä. Tiettyyn rajaan asti maa- tai kallioperästä pumpattu lämpömäärä korvautuu auringon säteilyn aiheuttaman lämpövirran lisääntyneellä absorptiolla maaperään, mutta liian suurella lämmön pumppauksella on pahimmillaan riskinä maalämpökaivon jäätyminen talvella. (Banks 2012, 70 - 71.) Pohjavesijärjestelmän etuna on, että pumpatun vesimäärän tilalle virtaa vastaava määrä saman lämpöistä vettä tilalle, kun kaivon antoisuus on riittävä. Tämä tarkoittaa, että kaivoon saapuva lämpömäärä Q_{in} on yhtä suuri kuin poistuva lämpömäärä Q_{out} , joten lämpövaraston lämpötila säilyy lähes vakiona.

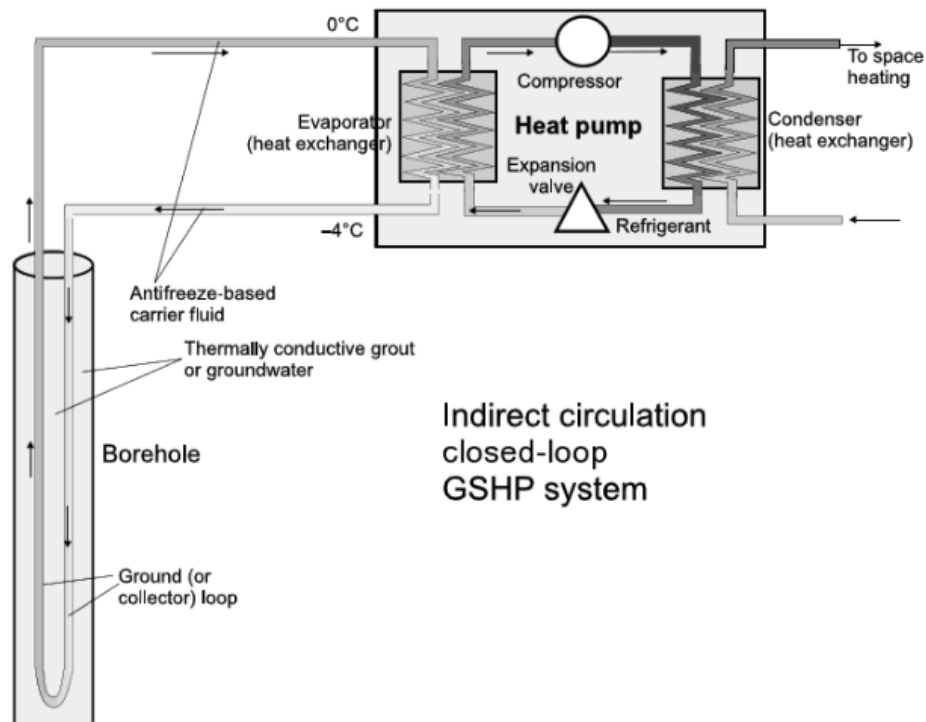
3 POHJAVESIENERGIA JA MAALÄMPÖ

Kuten maalämpöjärjestelmissä, myös pohjaveteen perustuvissa lämmitysjärjestelmissä hyödynnetään maaperään varastoitunutta lämpöenergiaa. Tässä luvussa käsitellään järjestelmien teknisiä eroavaisuuksia sekä pohjavesijärjestelmien toimintaan vaikuttavia tekijöitä.

3.1 Suljettu kierto (Closed-loop)

Perinteisissä maalämpöjärjestelmissä maaperään varastoitunutta lämpöä siirretään rakennuksen sisäiseen järjestelmään lämmönkeruuputkiston välityksellä. Lämmönsiirtoneste kiertää maahan asennetussa lämmönkeruuputkistossa, absorboi lämpöenergiaa ja kuljettaa lämmön edelleen lämpöpumpulle tai lämmönvaihtimelle, joka siirtää lämpöenergiaa edelleen rakennukseen. Tätä kutsutaan suljetuksi kierrokseksi (closed-loop). Ulkoisessa järjestelmässä kiertävän lämmönsiirtonesteen jäätymispiste tulee olla suljetussa kierrossa alhainen, jotta lämmönsiirtoputkisto ei jäädy talvella ja lämmönsiirtoon käytetäänkin usein etanoli- tai glykoliseosta. (Banks 2012, 176 - 178.)

Lämmönkeruuputkisto kulkee vaaka-asennettuna tai lämpökaivon kautta, jossa varsinainen lämmönsiirtoneste absorboi lämpöenergiaa maaperästä ja kiertää tämän jälkeen lämpöpumpulle, jonka avulla lämmönsiirtonesteseen absorboitu lämpö vapautetaan rakennuksen sisäiseen kiertoon lämpöpumpun sisäisessä kierrossa olevan kylmäaineen välityksellä. Tätä kutsutaan epäsuoraksi lämmönsiirroksi. Kuviossa 2 on esitetty suljetun kierron toimintaperiaate epäsuorassa lämmönsiirrossa lämpöpumpun avulla. (Banks 2012, 176.)



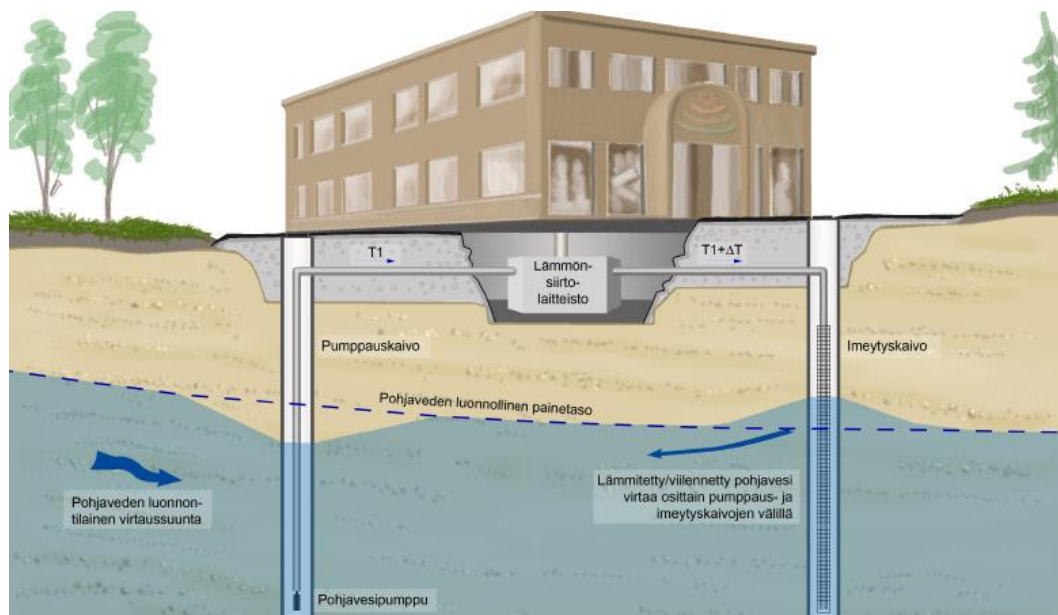
KUVIO 2. Suljetun kierron (closed-loop) toimintaperiaate epäsuorassa lämmönsiirrossa (Banks 2012, 176)

Lämmönsiirto on mahdollista tietyissä tapauksissa suorittaa myös ilman lämpöpumpun sisäistä kiertoa, jolloin puhutaan suorasta lämmönsiirrosta. Tällöin sama kylmäaine kiertää sekä ulkoisen järjestelmän keruuputkistossa että lämpöpumpussa. (Banks 2012, 174 - 175.)

3.2 Avoin kierto (Open-loop)

Kun pohjavesi toimii ulkoisen järjestelmän lämmönsiirron väliaineena, puhutaan niin sanotusta pohjaveden vapaasta kierrosta. Pohjavettä pumpataan pumppauskaivosta lämpöpumpulle tai lämmönvaihtimelle, josta se palautetaan edelleen injektointikaivon kautta takaisin pohjavesivarastoon eli akviferiin. Lämmityskaudella lämpöä siirretään pohjavedestä lämpöpumpun välityksellä rakennuksen sisäiseen järjestelmään ja vastaavasti jäähdityskaudella lämpöä siirretään rakennuksen sisäisestä järjestelmästä pohjaveteen. (Banks 2012, 161.)

Avoimessa kierrossa on lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä toimintakäivio sama, mutta lämpöpumpun toiminta päinvastainen. Kuviossa 3 on esitetty avoimen kierron toimintaperiaate (Saarikko 2017).



KUVIO 3. Avoimen kierron toimintaperiaate (Saarikko 2017)

Avoimessa kierrossa tulee huomioida pohjaveden luonnollinen virtaus ja sen suunnat pumppaus- ja injektointikaivojen paikkoja suunniteltaessa. GTK:n asiantuntijan Teppo Arolan (2017) mukaan maaperän rakenne tulee selvittää, jotta voidaan tehdä simulaatio pohjaveden kulkeutumisesta ja virtaus suunnista sekä pintaveden kulkeutumisesta pohjaveteen.

Kun virtausuunta ja pohjaveden lämpötilatasot tiedetään, voidaan suunnitella kaivojen paikat tehokkaasti. Lämmitysjärjestelmässä lämpimän puolen pumppauskaivot, josta pohjavettä pumpataan, asetetaan pohjaveden tulosuuntaan (ylävirran suuntaan) ja järjestelmästä palaava, viilentynyt vesi johdetaan riittävän kauas pohjaveden virtausuuntaan (alavirran puolelle). Tällöin viilentynyt pohjavesi ei pääse sekoittumaan haitallisessa määrin ylävirran pumppauskaivon normaalilämpöisen pohjaveden kanssa, vaan virtaa virtausuunnan mukaisesti kaivoista pois päin. Kun käytetään lämmin- ja kylmävarastoja, tulee etäisyys pumppauskaivojen välillä olla riittävä, ettei lämpötilat pääse tasaantumaan lämmitys- ja viilennyspuolen välillä. (Arola 2017.)

3.3 Akviferin lämpötilavaihtelut ja antoisuus

Vuodenajat ja ulkolämpötilan vaihtelut vaikuttavat matalilla syvyyksillä pohjaveden lämpötilaan. GTK:n tutkijan Teppo Arolan (2017) mukaan ulkolämpötilan kausivaihtelu vaikuttaa 10-15 metrin syvyyteen asti, jonka jälkeen pohjaveden lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden. Pohjaveden lämpötila on näillä syvyyksillä hieman vuoden keskilämpötilaa korkeampi ja esimerkiksi Lahdessa vuonna 2012 tehtyjen lämpötilamittausten perusteella luonnontilaisella alueella pohjaveden lämpötila on kyseisen kausivaihteluvyöhykkeen alapuolella n. 6 °C (Arola & Korkka-Niemi 2014). Urbaaneilla alueilla pohjaveden lämpötilat ovat hieman luonnontilaista korkeammat rakentamisen ja teollisuuden vaikutuksesta, koska rakennusten eristyksistä huolimatta osa lämmöstä pääsee johtumaan maaperään ja päällysteet vastaavasti estävät lämpöä johtumasta suoraan maaperästä ilmaan (Arola 2017).

Arola ja Korkka-Niemi (2014) jakoivat vuoden 2012 mittauspisteet vertailua varten kolmeen ryhmään ympäröivien alueiden maankäytön perusteella: luonnontilaisiin, urbaaneihin ja kaupunkien keskusta-alueisiin. Luonnontilaisilla alueilla ihmistoiminnan vaikutus on vähäistä, urbaaneilla alueilla on teollista toimintaa ja asutusta, mutta asuminen, rakennusten määrä ja muu infrastruktuuri ovat vähäisempää kuin keskusta-alueilla. Keskusta-alueet ovat tiiviisti rakennettuja ja siellä on monikerroksisia liike- ja toimistorakennuksia, jotka lisäävät entisestään lämpövirtaa ympäristöön ja maaperään. Samalla päällystetyt maakerrokset hidastavat lämmönjohtumista maaperän ja ulkoilman välillä. Täten keskusta-alueilla ja urbaaneilla alueilla voidaan havaita selvästi kohonneita pohjaveden lämpötiloja, kuten myös saadut mittaustulokset osoittavat.

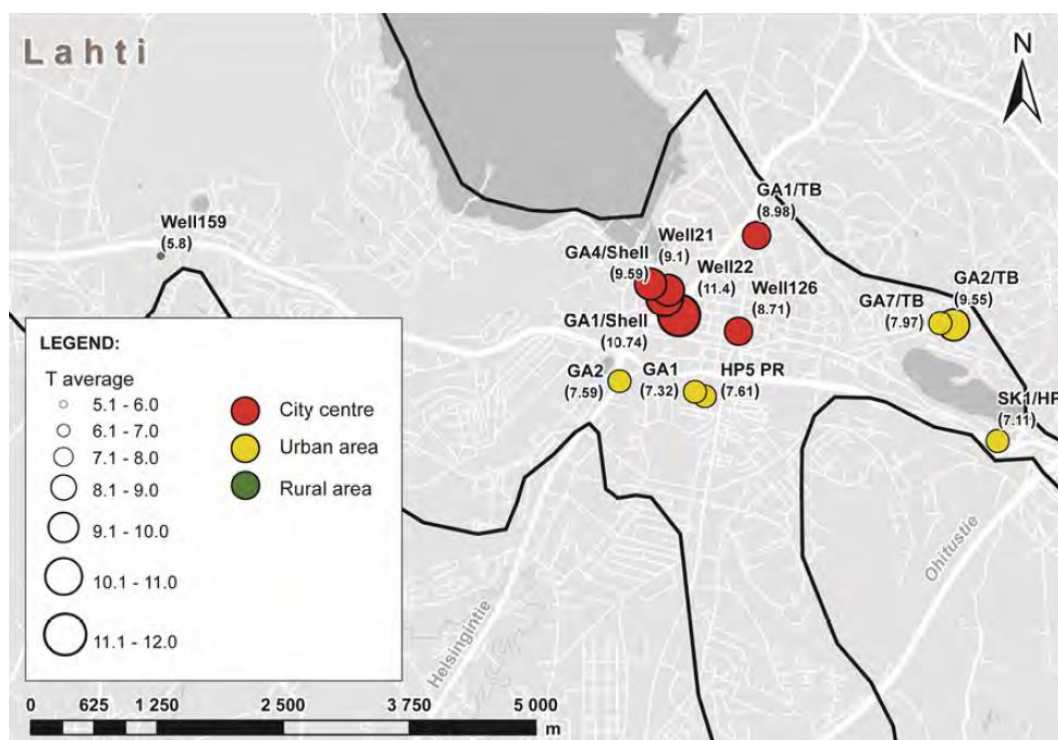
Lämpömittauksissa käytetyt mittalaitteet olivat YSI-556 MPS ja Eijelkamp Diver data logger, joiden avulla pystyttiin määrittämään pohjaveden lämpötilan kausivaihteluvyöhykkeen syvyys ja keskilämpötila. Keskilämpötilat on laskettu kausittaisen lämpötilan vaihteluvyöhykkeen alapuolelta mitatuista arvoista. Mittausarvot on otettu syyskuussa 2012 sekä maaliskuussa

2012, joka mahdollisti vertailun lämpötilojen välillä kesäkauden ja talvikauden jälkeen. Lahden mittauspisteiden mittaustulokset on esitetty taulukossa 1. (Arola & Korkka-Niemi 2014.)

TAULUKKO 1. Mittauspisteiden tulokset (Arola & Korkka-Niemi 2014)

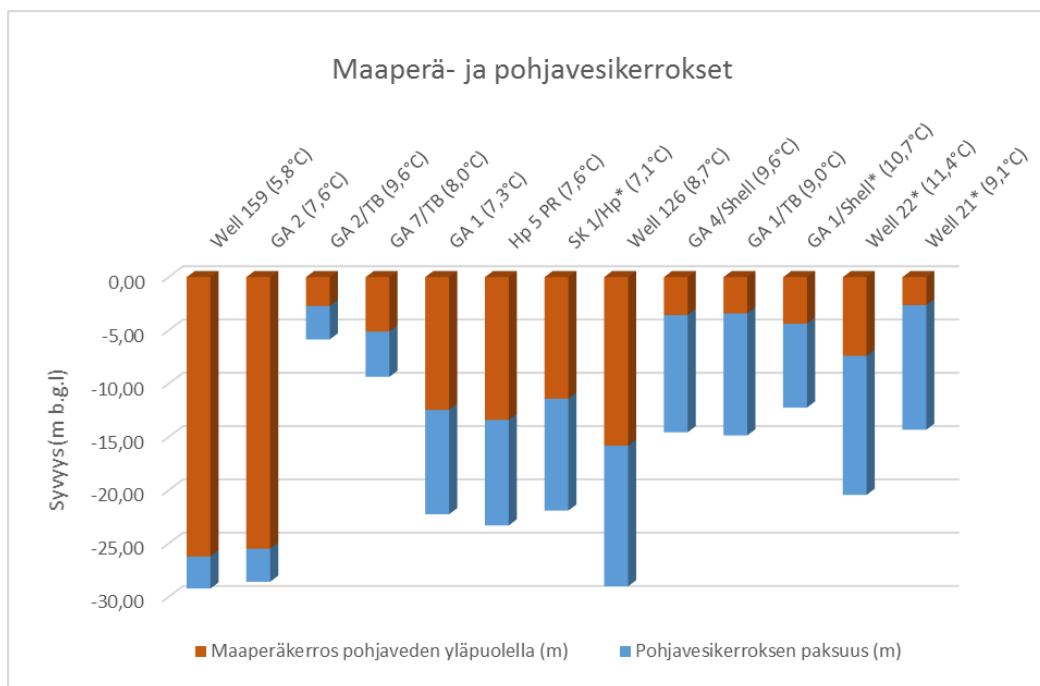
Pohjavesiputki / -kaivo	Syvyys (m b.g.l)	Pohjaveden pinnantas (m b.g.l)	Pohjavesikerroksen paksuus (m)	Maankäyttö	Pohjaveden keskilämpötila (°C)	Kausivaihtelu- vyöhykkeen paksuus (m)
Well 159	28,6	26,21	3,00	Luonnontilainen	5,8	0,5
GA 2	28,7	25,48	3,10	Urbaani	7,6	0
GA 2/TB	6,0	2,70	3,15	Urbaani	9,6	2,8
GA 7/TB	13,5	5,10	4,25	Urbaani	8,0	2
GA 1	21,3	12,45	9,80	Urbaani	7,3	1
Hp 5 PR	24,7	13,40	9,90	Urbaani	7,6	2
SK 1/HP*	29,0	11,40	10,50	Urbaani	7,1	0
Well 126	56,8	15,81	13,20	Kaupunki	8,7	0,5
GA 4/Shell	14,0	3,56	11,00	Kaupunki	9,6	5
GA 1/TB	22,2	3,40	11,45	Kaupunki	9,0	4
GA 1/Shell*	12,2	4,37	7,87	Kaupunki	10,7	4
Well 22*	23,0	7,38	13,05	Kaupunki	11,4	0,5
Well 21*	21,0	2,62	11,70	Kaupunki	9,1	3
m b.g.l = metriä maanpinnan alapuolella (meters below ground level)						
*Punaisella merkityissä riveissä on kaukolämpöputkisto alle 15 metrin etäisyydellä mittauspisteestä						

Mittauspisteiden sijainnit on esitetty kuviossa 4, jossa ympyrän koko ilmaisee kausivaihtelu- vyöhykkeen alapuolella olevan pohjaveden keskilämpötilan ja väri määritetyn maankäytön tilan. Keskusta-alueet on merkitty punaisella, urbaanit alueet keltaisella ja luonnontilaiset alueet vihreällä. Musta viiva mukailee pohjavesialueen rajaa. Ainoa luonnontilainen mittauspiste (Well 159) sijaitsee lännessä Hollolan rajalla. (Arola & Korkka-Niemi 2014.)



KUVIO 4. Mittauspisteiden sijainnit, maankäytön tila ja lämpötilat (Arola & Korkka-Niemi 2014)

Normaalin tilalämmityksen lisäksi teollisuudessa syntyy prosessien sivutuotteena runsaasti lämpöä ja osa lämmöstä päätyy lopulta maaperään, joten tällaiset mittau tulokset ovat odotettavissa olevia. Kertaalleen maaperään ja pohjaveteen johtunut lämpö olisikin talteen otettavissa ja erityisesti yli 15 metrin syvyydessä oleva pohjavesi olisi käyttökelpoista ympäri vuoden. Koska veden lämpötila on lähes vakio, on myös hyödynnettävissä oleva lämmitysteho lähes vakio riippumatta vuodenajasta. Pohjaveden pumppaus- ja imeytyskaivojen lopullisen syvyyden ratkaisee paikalliset pohjavesiolosuhteet. (Arola 2017.) Mittau tuloksista huomataan, että pohjaveden etäisyys maanpinnasta ja pohjavesikerrosten paksuus vaihtelevat mittauspisteiden välillä huomattavasti. Maaperä- ja pohjavesikerrosten paksuudet eri mittauspisteissä ovat esitetty kuviossa 5, joka on laadittu Arolan ja Korkka-Niemen (2014) raportissa ilmoittamien arvojen perusteella.



KUVIO 5. Mittaustulosten perusteella määritetyt maaperä- ja pohjavesikerrosten paksuudet eri mittauspisteissä

Open-loop-järjestelmää suunniteltaessa on geologiset ja hydrologiset olosuhteet otettava huomioon (Arola 2017). Pohjaveden määrän ja virtaaman tulee olla riittävä, jotta pumppauskaivossa veden taso kykenee palautumaan pumppauksesta eli pohjavettä tulisi virrata kaivoon pumppausjakson aikana vastaava määrä kuin vettä poistuu kaivosta. Kuviosta 5 nähdään, että pohjaveden pinnan taso, vesikerroksen paksuus ja maaperäkerroksen paksuus pohjaveden yläpuolella vaihtelevat merkittävästi eri mittauspisteissä. Pohjavesivaraston koko vaikuttaa osaltaan pumppauskaivon antoisuuteen ja eristävän maaperäkerroksen paksuus ulkolämpötilan vaikutukseen pohjaveden lämpötilaan. Näiden sekä muiden kaivon antoisuuteen ja pohjaveden lämpötilaan vaikuttavien tekijöiden määrittäminen vaatii kuitenkin tarkempia geologisia tutkimuksia ja kuten todettua, maaperän rakenne tulee selvittää, jotta voidaan tehdä simulaatio pohjaveden kulkeutumisesta ja virtaussuunnista sekä pintaveden kulkeutumisesta pohjaveteen (Arola 2017). Tämän avulla voidaan arvioida hyödynnettävissä oleva pohjaveden pumppausmäärä aikayksikköä kohden (l/s), joka todennetaan lopullisella pumppauskokeella.

Kokeessa siis mitataan pumpattavan pohjaveden määrä aikayksikössä ja pumppauksen aiheuttama vedenpinnan alenema pumpauskaivossa ja sen ympäristössä (pohjavesiputkista). Kun pumpaus lopetetaan, jatketaan mittauksia siten, että niillä voidaan todeta pohjavedenpinnan palautumiseen kulunut aika. Näistä arvoista voidaan laskea maakerroksen vedenantoisuudet. (Arola 2017.)

3.4 Pohjaveden energiasäilytys

Vuoden 2012 mittausten perusteella Lahdessa urbaaneilla alueilla pohjaveden keskilämpötila kaukolämpöputkien vaikutusalueen ulkopuolella (etäisyys > 15 m) on 8 °C. 8 °C:n lämpötilassa oleva pohjavesi on parhaimmillaan jäähdytysjärjestelmässä, mutta sitä voidaan hyödyntää tehokkaasti myös lämmitysjärjestelmässä. Lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen lämpöpumpulla pohjavedestä, jota voidaan jäähdyttää 1 °C:seen saakka ilman hyödynnettävän pohjaveden jäätymisriskiä. (Arola 2017.) Tämä tarkoittaa, että 8-celsiusasteisesta pohjavedestä voitaisiin ottaa erotuksen 8 °C – 1 °C verran lämpöä talteen eli $\Delta T = 7$ °C. Erotuksen mukainen lämpömäärä (Q) voidaan laskea kaavan 1 mukaisesti.

$$Q = cm\Delta T, \quad (1)$$

jossa c on aineen ominaislämpökapasiteetti (J/K*kg), m on aineen massa (kg) ja ΔT on lämpötilan muutos (Hautala & Peltonen 2014, 160).

Tällöin kuutiosta vettä (1000kg) saataisiin kaavan 1 perusteella 29 330 kJ eli 8,1 kWh lämpöenergiaa laskemalla sen lämpötilaa 7 °C, kun veden ominaislämpökapasiteetti on 4,19 kJ/(K*kg). Todellisuudessa rakennukseen siirrettävä lämpöenergiamäärä on korkeampi lämpöpumpun tekemän työn vaikutuksesta, joka siirtyy myöskin lämpönä järjestelmään. Laskennallisesti oletetaan, että kaikki lämpöpumpun tekemä työ muuttuu hyödynnettäväksi lämmöksi, vaikka osa lämmöstä saattaa johtua järjestelmän ulkopuolelle ja osa muuttuu koneen ääneksi (humina) (Banks 2012, 90). Ilman lämpöhäviöitä kokonaisenergian määrä, joka voidaan hyödyntää lämmityksessä, voidaan laskea kaavan 2 mukaisesti.

$$E_{\text{kok}} = Q + W, \quad (2)$$

jossa Q on vedestä vapautunut lämpömäärä ja W on ulkopuolisen voimanlähteen nesteeseen tekemä työ (Banks 2012, 93).

Näiden lukujen määrittämiseksi tulee open-loop-järjestelmässä tietää pohjaveden pumppauksen taajuus (l/s) ja lämpöpumpun lämpökerroin, jotka käsitellään luvussa 4.

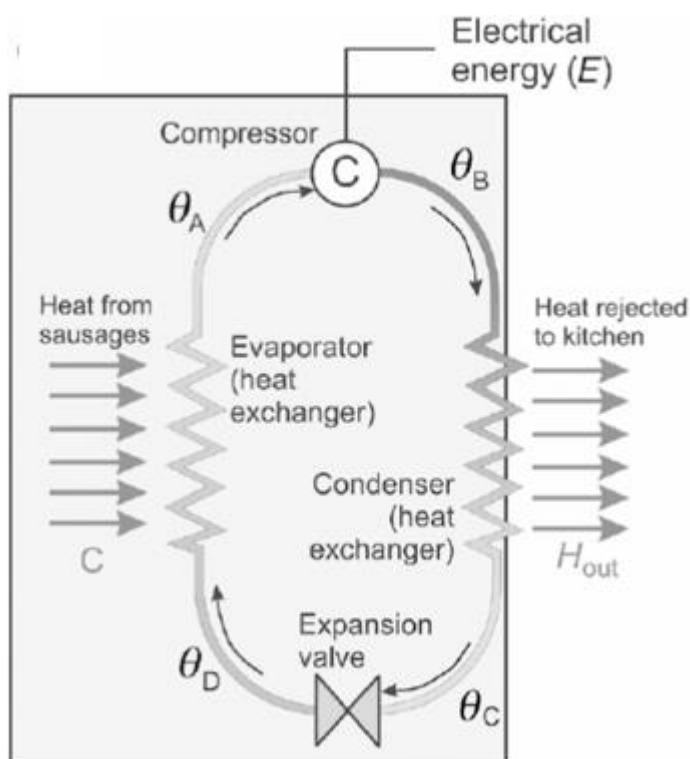
4 LÄMPÖPUMPUT POHJAVESIJÄRJESTELMÄSSÄ

Esimerkiksi tektonisten laattojen rajavyöhykkeellä on maanpinnan alta pumpattavan veden lämpötila luonnostaan korkea, jolloin lämmönsiirtonesteiden lämpötila on valmiiksi lämmitettävän tilan lämpötilaa korkeampi ja lämmön johtaminen rakennukseen voidaan tehdä passiivisella lämmityskierrolla, suoraan lämmönvaihtimen kautta. Tällainen on mahdollista esimerkiksi Islannissa, mutta jos lämpöenergiaa halutaan ottaa 5-celsiusasteisesta ilmasta tai 10-celsiusasteisesta pohjavedestä ja lämmittää huoneilma 21 °C:seen, ei tällainen ratkaisu ole mahdollinen. Lämpö siirtyy luonnollisesti lämpimämmästä väliaineesta kylmemmän väliaineen suuntaan, mutta kylmemmästä väliaineesta on mahdollista siirtää lämpöenergiaa lämpimämpään väliaineeseen lämpöpumpun avulla.

4.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumppujen toimintaperiaate on sama kuin jääkaapilla, joka on myös eräänlainen lämpöpumppu. Lämmönsiirtoneste (kylmäaine) kiertää kompressio- ja paisuntapuolen välillä siirtäen lämpöä mukanaan. Lämmönsiirtoneste valitaan siten, että se höyrystyy halutussa lämpötilassa ja esimerkiksi jääkaapissa tämä on n. 0 °C, kun tavoitelämpötila on n. 4 °C. Höyrystyäkseen neste tarvitsee tietyn lämpömäärän, jonka se absorboi jääkaapin sisältä höyrystimessä. Tämän jälkeen neste kiertää kompressiopuolelle eli lauhduttimelle, johon luodaan kompressorilla ylipaine, jonka vaikutuksesta nesteen höyrystymispiste nousee ja kondensoituminen alkaa korkeammassa lämpötilassa. Kondensoituessaan neste luovuttaa höyrystymisvaiheessa absorboimansa lämpömäärän verran energiaa, joka vapautuu radiaattorin kautta säteilemällä ulkoiseen järjestelmään eli jääkaapin tapauksessa keittiöön, jonka jälkeen kylmäaine siirtyy paisuntaventtiiliin kautta höyrystimelle ja kierto alkaa alusta. Tämä tarkoittaa, että jääkaappi lämmittää jatkuvasti keittiötilaa sen sisältä pumpatun lämpömäärän ja kompressorin tekemän työn verran (suurin osa kompressorin tekemästä työstä muuttuu lämmöksi). (Banks 2012, 88 - 89.) Jos siis jääkaapin

ovea pidetään auki, sama lämpömäärä kiertää keittiötilan ja jääkaapin välillä, mutta huone lämpenee koko ajan kompressorin tekemän työn verran. Kuviossa 6 on esitetty jääkaapin toimintaperiaate (Banks 2012, 88).



KUVIO 6. Jääkaapin toimintaperiaate (Banks 2012, 88)

Kun tiedetään kompressorin vaatiman sähköisen työn määrä W ja veden lämpötilan muutoksesta vapautunut lämpömäärä Q_{vesi} , voidaan laskea lämmitykseen vapautuva lämpömäärä H alaluvussa 3.4 esitetyn kaavan 2 mukaisesti eli $H = W_{\text{kompressori}} + Q_{\text{vesi}}$.

Osa kompressorin tekemästä työstä muuttuu ääneksi, mutta teoreettisessa laskennassa oletetaan yleisesti kaiken työn muuttuvan lämmöksi (Banks 2012, 90).

4.2 Lämpöpumpun hyötysuhde

Lämpöpumpun lämmönsiirron vaatima energia riippuu aineen lämpötilasta, josta lämpöä pumpataan eli $T_{\text{lähde}}$ ja aineen lämpötilasta, johon lämpöä siirretään eli $T_{\text{sisä}}$. Mitä isompi lämpötilaero eli $\Delta T = T_{\text{sisä}} - T_{\text{lähde}}$ on, sitä enemmän energiaa lämmön siirtämiseen tarvitaan. Esimerkiksi lämmön

siirtäminen 10 °C:n lämpötilassa olevasta pohjavedestä 21 °C:n sisälämpötilaan vaatii vähemmän energiaa, kuin lämmön siirtäminen 0 °C:n lämpötilassa olevasta ulkoilmasta vastaavaan tilaan.

Koska lämpöpumppu toimii kuin käänteinen lämpövoimakone, voidaan myös sen teoreettinen maksimihiötysuhde laskea ideaalikoneen hyötysuhteella eli Carnot'n hyötysuhteella (Banks 2012, 93). Lämpöpumpun maksimihiötysuhde on esitetty kaavassa 3.

$$\eta = \frac{H}{W} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (3)$$

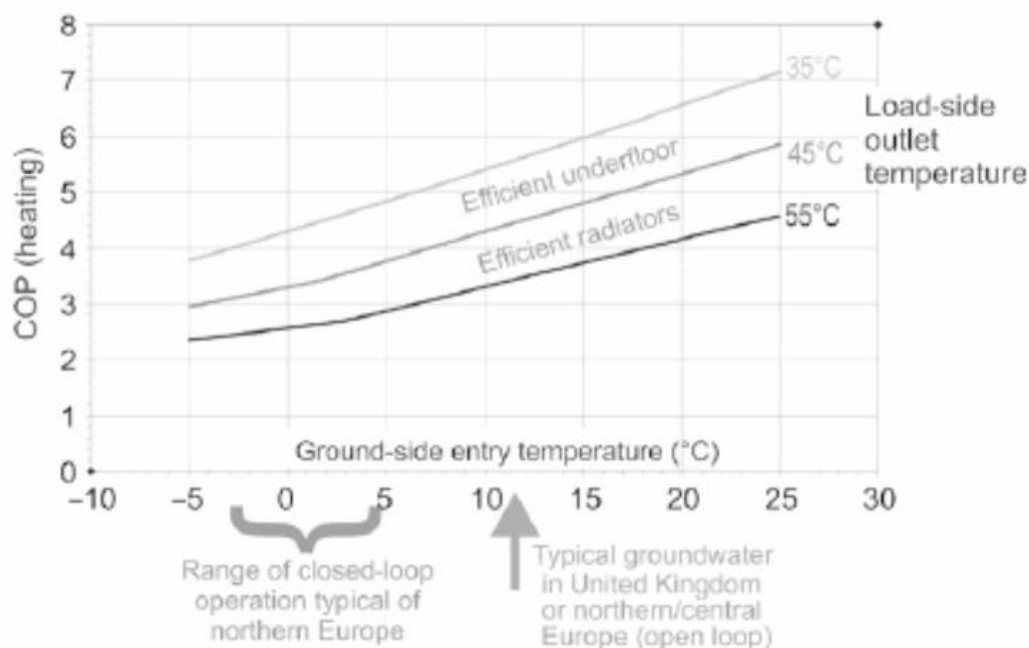
jossa H on lämpöpumpun tuottama lämpöenergia ja W on lämpöpumpun tekemä työ. (Banks 2012, 94.)

Koska kompressorit ovat pääsääntöisesti sähkötoimisia, voidaan tehty työ W korvata koneen kuluttamalla sähköenergialla E. Tällöin puhutaan lämpöpumpun lämmityksen COP_H-arvosta (Coefficient of performance), joka voidaan esittää kaavan 4 mukaisesti.

$$COP_H = \frac{H}{E}, \quad (4)$$

jossa E on sähköenergian kulutus ja H on lämmitykseen tuotettu lämpöenergian määrä. (Banks 2012, 94.)

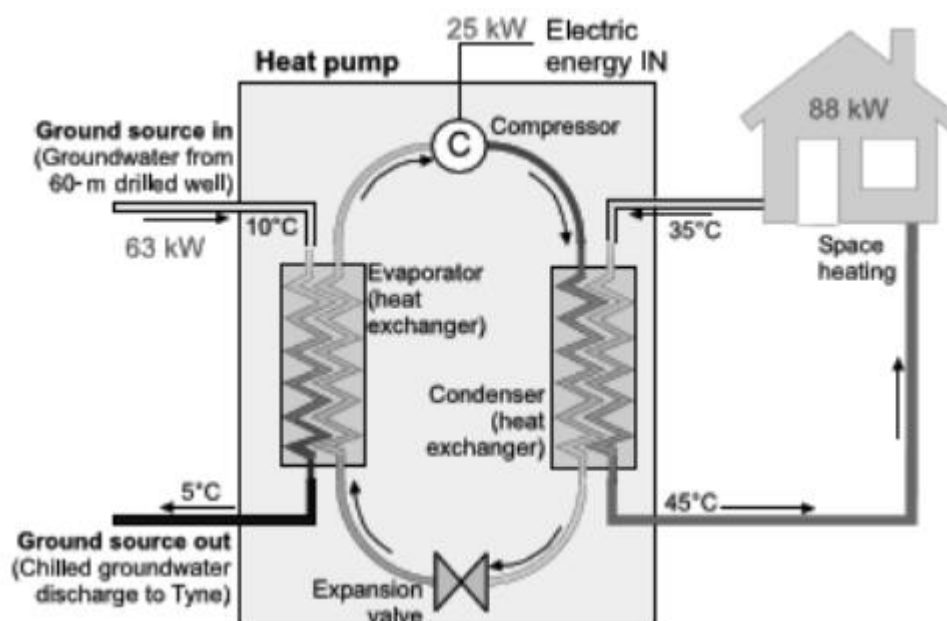
Lämpöpumppujen lämpökertoimet vaihtelevat hieman eri valmistajien välillä, mutta komponenttien ja lämmönsiirtonesteiden ollessa hyvin samankaltaisia voidaan tyypillisen maalämpöpumpun lämpökertoimen riippuvuudelle lämpötilaerosta laatia teoreettinen kuvaaja. Kuviossa 7 on esitetty lämpöpumpun COP-arvon riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta ja COP-arvon vaihtelu suhteessa lämmitettävän kohteen eli vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän veden lämpötilaan. Rakennuksen sisäisen vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän lämpötiloina on käytetty 35 °C, 45 °C ja 55 °C. (Banks 2012, 94 - 95.)



KUVIO 7. Lämpökertoimen riippuvuus lämmönlähteen ja kohteen lämpötilasta eli lämpötilaerosta $\Delta T = T_{\text{sisä}} - T_{\text{lähde}}$ vesikiertoisessa lämmitysjärjestelmässä (Banks 2012, 95)

Vuoden 2012 mittaustulosten perusteella on pohjaveden keskilämpötila Lahdessa urbaaneilla alueilla kausivaihteluista riippumattomalla syvyydellä 8 °C, joka vastaisi rakennuksen sisäisen kierron veden lämpötilan ollessa 35-45 °C COP_H -arvoa 4-5. Lämpötilassa 55 °C lämpökerroin olisi jo lähes 3, jota voidaan pitää minimirajana kannattavuuden kannalta.

Kuviossa 8 on esimerkki Pohjois-Englannissa käytössä olevasta pohjavesienergiaan perustuvasta lämmitysjärjestelmästä, jonka avulla voidaan määrittää vertailukohta open-loop-järjestelmän lämpökertoimelle. Pohjavettä pumpataan 60 metrin syvyydestä kaivosta virtausnopeudella 3 l/s. Pumpattavan pohjaveden lämpötila on n. 10 °C ja vesi johdetaan 5-celsiusasteisena pois järjestelmästä edelleen läheiseen suistoon, joten pohjavedestä hyödynnetään tällöin lämpötilaerotuksen $\Delta T = 5$ °C verran lämpöä. Lämpöpumppu tekee järjestelmään työtä teholla 25 kW ja lämpöä siirtyy pohjavedestä sisäiseen järjestelmään teholla 63 kW, jolloin järjestelmän kokonaislämmitysteho on 88 kW. (Banks 2012, 87; 93.)



KUVIO 8. Lämmitysjärjestelmä Pohjois-Englannissa, Hebburnin Eco-Centre:ssä (Banks 2012, 93)

Järjestelmän kuluttaman sähköenergian määrä on siis 25 kW ja kokonaislämmitysteho 88 kW. Tällöin kyseisen järjestelmän lämpöpumpun lämmityksen lämpökerroin $COP_H = 88 \text{ kW} / 25 \text{ kW} = 3,52$. Tämä on alhaisempi kuin kuvion 7 kuvaajasta vastaaville olosuhteille luettava arvo. Lähteen lämpötilan ollessa 10 °C ja lämmitettävän sisäisen kierron nesteen lämpötilan ollessa 45 °C on kuvaajalta luettava COP_H :n arvo yli 4. Kuvaajan arvoja voidaan pitää suuntaa antavina, mutta todellisen lämpökertoimen arvo vaihtelee aina laitekohtaisesti.

4.3 Pohjaveden lämmitys- ja jäähdytysvaikutus lämpöpumppujärjestelmässä

Kuten alaluvussa 3.4 on esitetty, vedestä vapautuva lämpömäärä voidaan määrittää kaavan 1 avulla eli $Q = cm\Delta T$. Tämän avulla voitaisiin määrittää lämpömäärän siirtyminen lämmitettävään tilaan avoimessa passiivisessa järjestelmässä, jossa lämpö siirtyy pohjavedestä ulkoiseen järjestelmään suoraan lämmönvaihtimen kautta. Myös tällöin kiertovesi- ja uppopumput tekevät työtä, josta myös osa muuttuu lämpöenergiaksi. Tällainen järjes-

telmä on käytössä Arlandan lentokentällä, jota käsitellään tarkemmin alaluvussa 6.1. Aktiivisessa open-loop-järjestelmässä lämpö siirretään pohjavedestä sisäiseen järjestelmään lämpöpumpun välityksellä ja tällöin lämmitysvaikutus H on vedestä vapautuneen lämpömäärän Q ja lämpöpumpun kompressorin tekemän sähköisen työn E summa eli $H = Q + E$. Tämä tieto ei riitä varsinaisen lämmitysjärjestelmän suunnitteluun, vaan laskentaa varten tulee tietää pumpattava vesimäärä aikayksikköä kohden, tämän aikaan saama lämmitysteho sekä samassa aikayksikössä lämpöpumpun tekemän työn lämmitysvaikutus, joiden yhteisvaikutuksesta saadaan kokonaislämmitysteho. Pohjavedestä pumpattavalle lämpömäärälle voidaan laskea teho G virtaaman Z (kg/s) avulla, joka on esitetty kaavassa 5.

$$G = Z \cdot c \cdot \Delta T, \quad (5)$$

jossa Z on veden virtaama (kg/s), c on veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/K*kg) ja ΔT on veden lämpötilan muutos. (Banks 2012, 161.)

Tällöin esimerkiksi Lahdessa vuonna 2012 tehtyjen mittausten perusteella lasketulla urbaaneiden alueiden pohjaveden keskilämpötilalla $T = 8\text{ °C}$ ja veden virtaamalla $Z = 2\text{ kg/s}$ olisi pohjavedestä siirrettävissä lämpöä lämpötilaerotuksen verran eli $\Delta T = 8\text{ °C} - 1\text{ °C} = 7\text{ °C}$, jolloin pumpattavan lämpömäärän tehoksi saadaan $G = 2\text{ kg/s} \cdot 4,19\text{ kJ/K*kg} \cdot 7\text{ K} = 58,66\text{ kJ/s} \approx 59\text{ kW}$. Kun tiedetään lämpöpumpun lämmityksen lämpökerroin COP_H , voidaan kokonaislämmitysteho H laskea kaavan 6 avulla (Banks 2012, 161).

$$H = \frac{G}{1 - \frac{1}{COP_H}} \quad (6)$$

Jäähdytysteho voidaan laskea myös samalla tavalla käänteisesti, kun tiedetään jäähdytyksen kylmäkerroin eli COP_C . Tällöin lämmityksen laskennassa huomioitu pohjavedestä pumpattavan lämpömäärän teho G vastaa jäähdytyksessä tehoa, jolla lämpöä siirretään ympäristöön eli $G_{\text{Ympäristö}}$. Jäähdytys on siis mahdollista suorittaa lämpöpumpun avulla, jolloin sen toimintajärjestys on käänteinen eli rakennuksen sisäisestä järjestelmästä

siirretään lämpöä ulkoiseen lämpönieluun. Ilmalämpöpumpussa lämpönieluna toimii ulkoilma, joka voi olla kesäaikana jopa yli 25 °C, kun taas pohjavesijärjestelmässä lämpönieluna toimii maanalainen pohjavesivarasto, jonka lämpötila on 10-15 metrin syvyydessä lähes vakio lämpötilassa ympärivuoden. Voidaankin todeta, että lämmön siirtäminen rakennuksesta 8-celsiusasteiseen pohjaveteen on tehokkaampaa kuin lämmön siirtäminen rakennuksesta yli 20-celsiusasteiseen ulkoilmaan.

Ilmalämpöpumppujen investointikustannukset ovat kuitenkin halvemmat kuin maalämpöpumpuilla tai pohjavesikäyttöisillä lämpöpumpuilla, mikä tulee huomioida kustannuslaskelmia ja takaisinmaksuaikaa arvioitaessa. Mikäli jäähdytystarve on suuri, on pohjavesijärjestelmän ehdottomasti parhaimmillaan, koska jäähdytyksen COP_c-arvo voi olla jopa 30 pohjaveden mukaillessa luonnontilaista lämpötilaa (Arola 2017; Energy Star 2017). Toisaalta esimerkiksi lämpökeskusten ja kaukolämpöputkien läheisyydessä voidaan havaita kohonneita pohjaveden lämpötiloja, joka laskee jäähdytyksen tehoa (Arola & Korkka-Niemi 2014). Lämmityskaudella säästö energiakustannuksissa riippuu keskimääräisestä ulkolämpötilasta, koska ilmalämpöpumppujen lämpökerroin laskee selvästi ulkolämpötilan laskiessa alle 0 °C (ScanOffice 2017). Tämän perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että pitkällä pakkasjaksoilla pohjavesilämpöpumpuilla syntyy eniten säästöä käyttökustannuksissa vertailussa ilmalämpöpumppuihin. Ilmalämpöpumppu- ja open-loop-järjestelmiä on vertailtu tarkemmin alaluvussa 6.2.

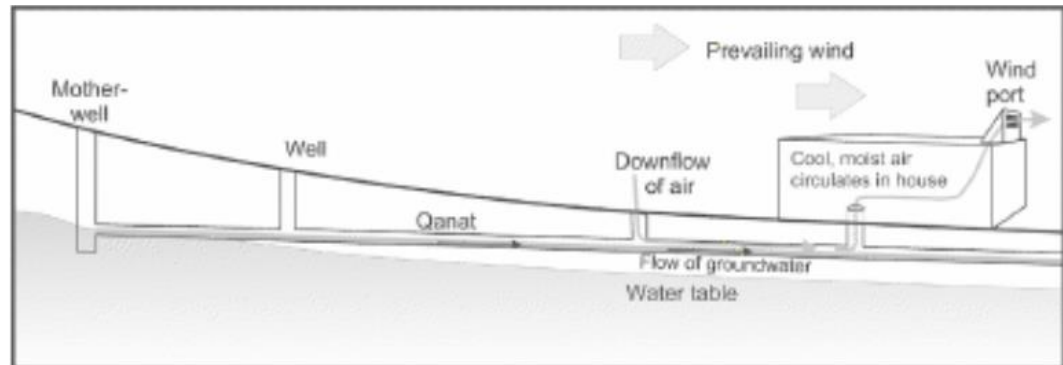
5 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT

Suomen olosuhteissa pohjaveden lämpötila on luonnontilaisena alhainen ja esimerkiksi Lahdessa urbaaneilla alueilla pohjaveden lämpötila on vuoden 2012 mittauksen perusteella keskiarvoltaan 8 °C (Arola & Korkka-Niemi 2014). Tämän vuoksi pohjavesijärjestelmä olisi luontaisesti parhaimmillaan jäähdytyskaudella ja jäähdytys olisi mahdollista toteuttaa alhaisen lämpötilan vuoksi myös passiivisesti lämmönvaihtimien välityksellä ilman lämpöpumppua, joka laskee jäähdytysjärjestelmän sähköenergian tarvetta ja nostaa täten kylmäkerrointa. Lämpöpumppujen kylmäkertoimet open-loop-järjestelmissä vaihtelevat paljon eri valmistajien välillä ja riippuen testauksessa käytetyistä standardeista. Arolan (2017) mukaan pohjavesijärjestelmien laskennassa on perusteltua käyttää kylmäkertoimen arvoa $COP_c = 30$. Lämpöpumppujen lämpö- ja kylmäkertoimia vertaillaan tarkemmin alaluvuissa 6.2 ja 6.3.

5.1 Perinteiset jäähdytysratkaisut

Jäähdytyksen tarve on suurta esimerkiksi Afrikassa ja Aasiassa, missä on ollut käytössä jo pitkään perinteisiä, hyvin yksinkertaisia jäähdytysratkaisuja. Rakennuksissa on paksut kiviseinät, jotka toimivat itsessään lämpövarastona korkean lämmön varastointikykynsä ansiosta. Lisäksi mm. Lähi-idässä hyödynnetään painovoimasta ilmanvaihtoa jäähdytysratkaisuna. Kuuma ilma saadaan virtaamaan alimmista kerroksista rakennuksen läpi ohjaamalla ilmaa rakennuksen ylimpiin rakenteisiin asennettujen ilmanvaihtoaukkojen kautta ulos. Tällöin puhutaan ns. solar chimney -tekniikasta, kun ilma saadaan kiertämään ilmakerrosten lämpötilaeron vaikutuksesta painovoimaisesti. Tätäkin tekniikkaa voidaan tehostaa, jos pohjavettä on saatavilla. Ilma voidaan pakottaa kiertämään pohjavesivaraston kautta, jolloin tuloilma luovuttaa osan lämmöstään pohjaveteen ja tämän jälkeen viilentynyt ilma voidaan johtaa edelleen rakennukseen. Kun ilma lämpenee rakennuksessa, se nousee luontaisesti ylöspäin ja poistuu rakennuksen yläosan ilmanvaihtaukoista jälleen ulos järjestelmästä. Järjestelmän periaatekaavio on esitetty kuviossa 9. Tuloilma pakotetaan samaan

tunneliin pohjaveden kanssa, jolloin se luovuttaa osan lämmöstään veteen. Tämän jälkeen viilentynyt ilma ohjataan rakennukseen, josta se poistuu lämmittämään katolla olevasta ilmanvaihtokanavasta. (Banks 2012, 133 - 137.)



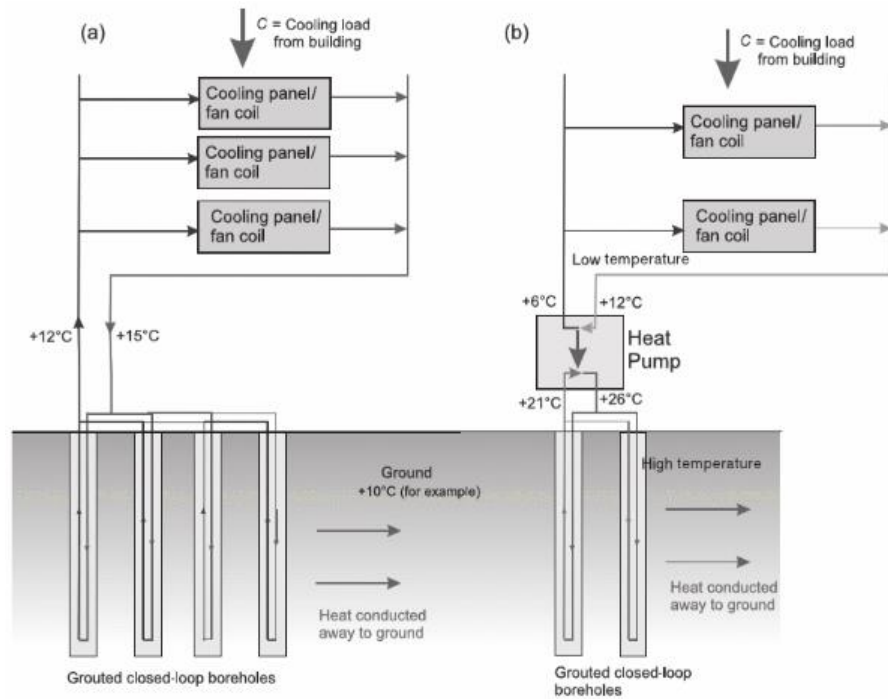
KUVIO 9. Perinteinen jäähdytysratkaisu Lähi-idässä (Banks 2012, 137)

5.2 Aktiivinen ja passiivinen jäähdytys

Myös Pohjois-Euroopassa ja jopa Siperiassa on tarvetta jäähdytykselle paitsi kesäisin, myös talvella. Esimerkiksi teollisuuden prosesseista syntyvää lämpöä joudutaan johtamaan ympärivuoden ulos rakennuksista. (Banks 2012, 133 - 135.) Jäähdytys voidaan huoneilman osalta toteuttaa keskitetysti koko rakennuksessa tai hajautetusti huone- tai kerroskohtaisesti (Kurnitski 2007). Keskitetyssä järjestelmässä jäähdytys voidaan suorittaa aktiivisena eli välillisenä tai passiivisena eli vapaana jäähdytyksenä. Aktiivisessa jäähdytysjärjestelmässä lämmönsiirron väliaine viilennetään kylmäkoneen avulla, jossa toimintaperiaate on sama kuin lämpöpumpuilla jäähdytyskaudella. Komponentit ja toimintavaiheet ovat samat eli kylmäkoneen sisällä lämmönsiirtonesteenä toimiva kylmäaine kiertää kompressiopaisunta-kiertoa siirtäen lämpöä faasimuutoksen avulla höyrystimen puolelta lauhduttimen puolelle. Lämmönsiirron väliaineena toimii usein vesi, joka johdetaan esimerkiksi jäähdytyspattereihin, joilla voidaan viilentää esimerkiksi tuloilmaa. Jäähdytyspatterit ovat tällöin asennettuina joko ilmanvaihtokoneeseen tai suoraan tuloilmakanavaan (Kurnitski 2007). Samaa periaatetta voidaan hyödyntää avoimen kierron pohjavesijärjestelmässä.

Tällöin pohjavesi toimii ulkoisen järjestelmän lämmönsiirtoaineena ja vastaanottaa sisäisen järjestelmän lämpöenergiaa passiivisesti suoraan lämmönvaihtimen tai aktiivisesti lämpöpumpun välityksellä. Passiivisessa järjestelmässä jäähdytysjärjestelmän energiankulutus koostuu uppopumppujen ja kiertovesipumppujen sähköenergiantarpeesta, joka on alhaisempi kuin lämpöpumppujärjestelmällä (Arola 2017). Koska järjestelmän sähkönkulutus on pienempi, kasvaa myös jäähdytysjärjestelmän kylmäkerroin.

Perinteisen maalämpöjärjestelmän suljetussa kierrossa (closed-loop) erillinen lämmönsiirtoneste kiertää putkistossa lämpökaivon kautta siirtäen lämpöä maaperään putkiston kautta johtumalla (Banks 2012, 176 - 178). Tämä ei ole yhtä tehokas tapa siirtää lämpöä, koska erillinen lämmönsiirtoneste tuo ylimääräisen lämmönsiirtovaiheen järjestelmään lämmön siirtyessä lämmönsiirtonesteestä maaperään, joka laskee järjestelmän tehoa ja lisäksi lämmönsiirtonesteen vuotomahdollisuus lisää ympäristön pilaantumisriskiä. Kuviossa 10 on esitetty aktiivisen ja passiivisen jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaatteet maalämpöjärjestelmässä (Banks 2012, 146). Toimintaperiaate on sama myös avoimessa kierrossa, mutta kaivojen lämpötilat ovat usein alhaisemmat. Suljetussa kierrossa kaivoon siirretty lämpöenergia ei siirry yhtä tehokkaasti pois lämpökaivosta kuin avoimessa kierrossa. Tämän vuoksi suljetussa kierrossa kaivon tai keruupiiriin lämpötila nousee jäähdytyskauden aikana, joka alentaa kylmäkerrointa.



KUVIO 10. (a) Passiivinen jäähdytysjärjestelmä ja (b) aktiivinen jäähdytysjärjestelmä maalämpöjärjestelmässä (Banks 2012, 146)

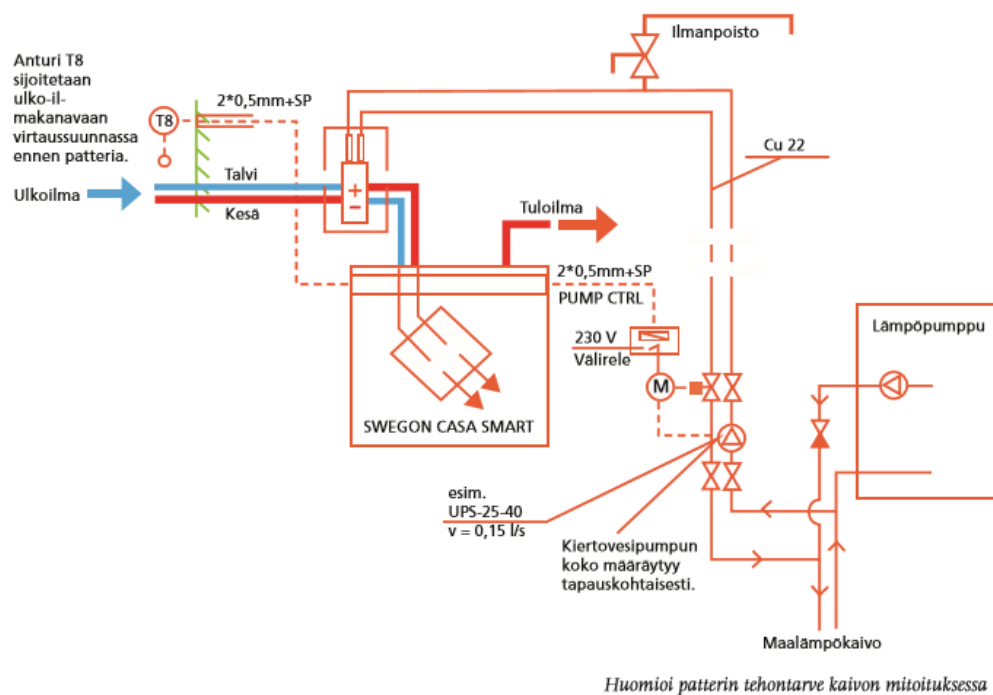
Huoneiston jäähdytys voidaan toteuttaa esimerkiksi siirtämällä lämpöä tilasta passiivisten jäähdytyspalkkien välityksellä lämmönsiirtonesteeseen tai jäähdyttämällä tuloilmaa (Kurnitski 2007). Kuvassa 1 on Swegon maalioskanavapatteri tuloilman viilennykseen ja lämmitykseen (Swegon 2017). Tuote on tarkoitettu liitettäväksi maalämpöpumpun yhteyteen, jolloin lämmönsiirtoneste kiertää patterissa jäähdyttäen tai lämmittäen tuloilmaa. Periaate on sama open-loop-järjestelmässä, mutta tällöin lämmönsiirron väliaineena toimisi pohjavesi.



Ilmanvaihtolaite Swegon CASA W3/W4/W5/R3/R5
SDHW 250 K3W

KUVA 1. Tuloilman viilennys-/lämmityspatteri koteloineen (Swegon 2017)

Swegon-esimerkkijärjestelmään sisältyy nestekiertoisen kanavapatterin lisäksi toimilaite venttiileineen ja tarvittavat anturoinnit. Valmiin järjestelmän toimintakaavio on esitetty kuviossa 11 (Swegon 2017).



KUVIO 11. Swegon tuloilman viilennys-/lämmitysjärjestelmän toimintakaavio (Swegon 2017)

Vaikka pohjavesijärjestelmässä passiivinen jäähdytys on tehokkaampaa kuin aktiivinen jäähdytys, on aktiivinen jäähdytys pohjavesijärjestelmää hyödyntäen kuitenkin tehokkaampaa kuin esimerkiksi ilmalämpöpumpulla.

Ilmalämpöpumppu siirtää sisäisestä järjestelmästä rakennuksen lämpöä ns. lämpönieluna toimivaan ulkoilmaan, jonka lämpötila saattaa olla kesällä 20-25 °C. Vastaavasti pohjavesijärjestelmässä lämpöpumppu siirtää sisäisen järjestelmän lämpöenergiaa lämpönieluna toimivaan pohjaveteen, joka on Lahden mittauspisteissä vuonna 2012 ollut luonnontilaisella alueella lämpötilaltaan 5,8 °C ja urbaaneilla alueillakin keskiarvoltaan 8 °C (Arola & Korkka-Niemi 2014). Tällöin lämmön siirtäminen huoneen lämpötilasta ulkoilmaan kuluttaa enemmän energiaa kuin lämmön siirtäminen pohjaveteen, joka on kausivaihteluvyöhykkeen alapuolella lähes vakio­lämpötilassa ympäri vuoden.

Ilmalämpöpumpuilla kylmäkerroin laskee ulkolämpötilan noustessa, jonka vuoksi on lämpöpumppujen vertailua varten otettu käyttöön koko jäähdytyskauden keskimääräistä jäähdytystehoa kuvaava SEER-arvo (Seasonal Energy Efficiency Ratio). Esimerkiksi Panasonic Nordic CE9PKE -ilmalämpöpumpulla SEER on 7,25. (Ilmalämpöpumppu.fi 2017.) Vastaavasti WaterFurnace 7 Series 700A11 -lämpöpumpun kylmäkerroin open-loop-järjestelmässä on Energy Starin (2017) mukaan 37,2 – 42,5. Testitulokset on valmistajan mukaan saavutettu standardin ISO 13256-2 määrittelemissä olosuhteissa (WaterFurnace 2017). Kyseisessä standardissa on määritetty pohjavesijärjestelmän pumppauskaivolta rakennukselle saapuvan pohjaveden lämpötilaksi lämpökertoimen testiolosuhteissa 10 °C ja kylmäkertoimen testiolosuhteissa 15 °C (ISO 13256-2:1998, 5). Vertailun tuloksia on esitetty laajemmin alaluvussa 6.2.

6 POHJAVESI ENERGIAVARASTONA

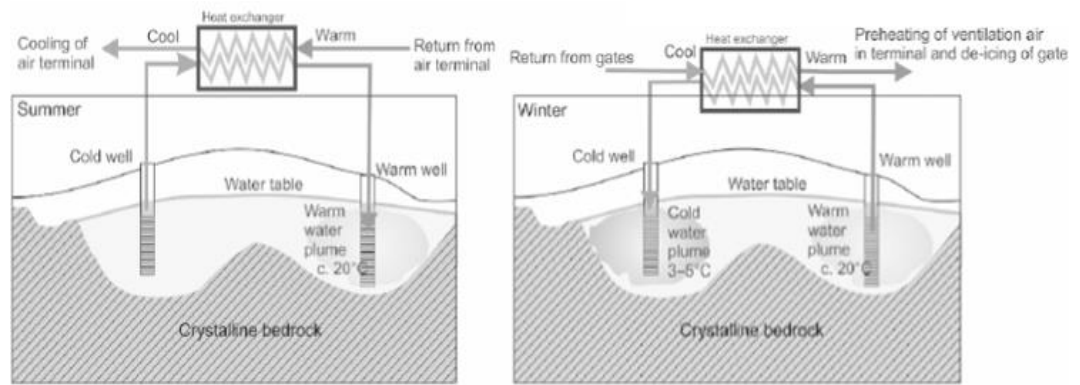
Vaikka Suomi tai Ruotsi eivät sijaitsekaan tektonisten laattojen rajavyöhykkeellä, on silti passiivisten lämmitysjärjestelmien hyödyntäminen mahdollista pohjaveden kausivarastoinnin avulla. Tällöin lämmityksessä hyödynnettävän pohjaveden lämpötilaa voidaan nostaa varastoimalla jäähdytyskaudella injektointikaivoon palautettavaa lämminnyttä vettä ja vastaavasti jäähdytyksessä käytettävän veden lämpötilaa voidaan laskea varastoimalla lämmityskaudella viilentynyttä vettä (Banks 2012, 76 - 77). Lämmön kausivarastointi pohjaveteen edellyttää pohjaveden alhaista virtaamaa, jotta lämpö ei siirry pohjaveden mukana muualle ympäristöön (Sakai ym. 2017). Täten alueen geologiset ja hydrologiset olosuhteet asettavat rajoitteita tämän kaltaisille järjestelmille.

6.1 Passiivijärjestelmät ja lämpöenergian kausivarastointi

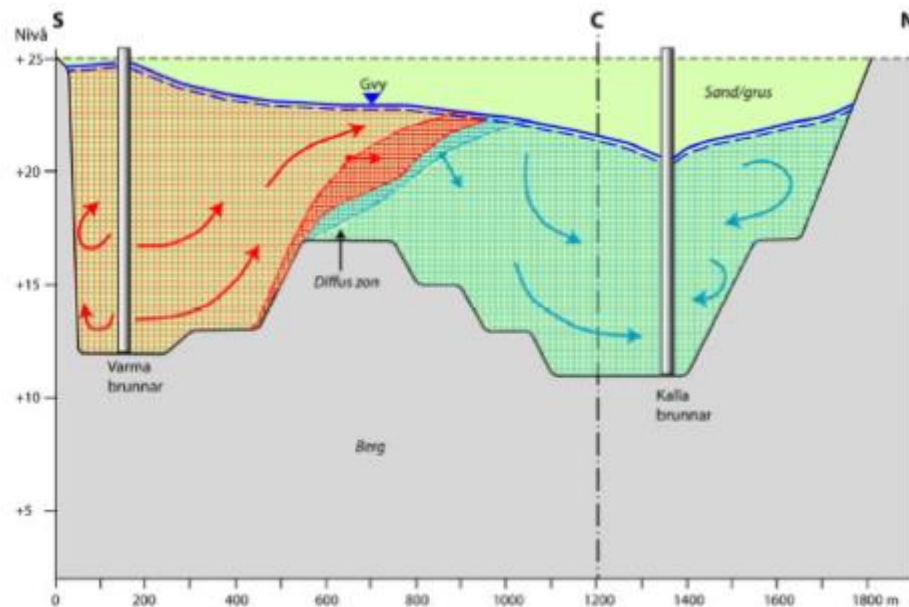
Yksinkertaisimmillaan lämmönsiirto tapahtuu niin sanotulla passiivilämmityksellä- tai jäähdytyksellä, jolloin lämmönsiirto ulkoisesta järjestelmästä eli pohjavedestä sisäiseen järjestelmään tapahtuu suoraan lämmönvaihtimen välityksellä ilman lämpöpumppua. Tämä on mahdollista, jos lämmitysjärjestelmän käyttölämpötila on riittävän alhainen ja pohjavesivaraston lämpötila on riittävän korkea. Esimerkiksi Arlandan lentokentällä hyödynnetään tällaista passiivilämmitystä mm. jään ja lumen sulattamiseen terminaali-alueelta sekä vastaavasti passiivijäähdytystä rakennusten jäähdytyksessä. Lentokentän lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä perustuvat lämmön kausivarastointiin pohjaveteen, joka on mahdollista luontaisen pohjavesimuodostuman ansiosta. Kallioperä jakaa pohjavesivarastot kahteen ”osastoon”, joista toista käytetään lämpimän veden varastointiin ja toista viileän veden varastointiin. (Banks 2012, 76 - 77.) Tällaisen pohjaveteen perustuvan lämmön varastointijärjestelmän (ATES) edellytyksenä on pohjaveden riittävän alhainen virtaama ja liikkuvuus, jotta lämpö ei siirry kaivosta muualle ympäristöön (Sakai ym. 2017). Kesän viilennyskaudella pohjavettä pumpataan kylmän kaivon puolelta isoihin levylämmönvaihtimiin, joiden

toisella puolella kiertää rakennuksen sisäisen järjestelmän lämmönsiirtoneste. Lämmönsiirtoneste absorboi kiertonsa aikana lentokenttärakennuksista lämpöä ja vapauttaa tätä lämpöenergiaa pohjaveteen saapuessaan lämmönvaihtimelle. Pohjavesi lämpenee lämmönvaihtimessa, jonka jälkeen se johdetaan lämpimän osaston kaivoon n. 15-20 °C:n lämpötilassa. Lämpimään kaivoon johdettavaa lämpö määrää voidaan lisätä kierrättämällä rakennuksen sisäisen järjestelmän lämmönsiirtonestettä kiitotie- ja porttialueiden alapuolelle asennettujen putkilinjojen kautta, jotka talvella ovat käytössä jään sulattamista varten ja kesällä toimivat isona aurinkokehäinpinta-alana. (Wigstrand 2009; Banks 2012, 76 - 77.)

Talven lämmityskaudella toimintajärjestys on päinvastainen eli kesällä pohjaveden lämpimään osastoon varastoitua lämpöä hyödynnetään pumppaamalla lämpimän puolen kaivosta pohjavettä levylämmönvaihtimille, jotka lämmittävät sisäisessä järjestelmässä kiertävää lämmönsiirtonestettä. Lämpöä hyödynnetään terminaalirakennusten tuloilman esilämmityksessä sekä jään ja lumen sulattamiseen kiitotie- ja porttialueilta kierrättämällä lämmönsiirtonestettä niiden alapuolelle asennetussa putkituksessa. Jäähdytynyt lämmönsiirtoneste palaa lämmönvaihtimelle, jossa pohjavesi luovuttaa osan lämpö määrästään lämmönsiirtonesteelle, jonka jälkeen pohjavesi johdetaan kylmän puolen kaivoon varastoitavaksi n. 3-5 °C:n lämpötilassa seuraavan kesän käyttöä varten. Järjestelmässä on yhteensä 11 kaivoa, jotka ovat syvyydeltään 15-30 metriä. Näistä viisi on viilennysaivoja ja kuusi on lämmityskaivoja, jotka kaikki ovat varustettu sekä uppopumpuilla, että veden takaisininjektointiputkituksella. (Wigstrand 2009; Banks 2012, 76 - 77.) Arlandan lentokentän lämmönsiirtojärjestelmän toimintakaavio kesä- ja talvikaudella on esitetty kuviossa 12 (Banks 2012, 77). Järjestelmän jäähdytyskauden hydraulinen mallinnus sekä lämpimän ja kylmän puolen diffuusioalue on esitetty kuviossa 13 (Andersson 2009). Palautuskaivolle johdettu vesi pyrkii palautumaan hydraulisten olosuhteiden muuttuessa pumppauskaivon suuntaan. Lämpö johtuu luonnollisesti lämpimämmästä väliaineesta kylmemmän väliaineen suuntaan, joka aiheuttaa termistä palautumista. Hydraulista ja termistä palautumista on käsitelty tarkemmin alaluvussa 6.5.

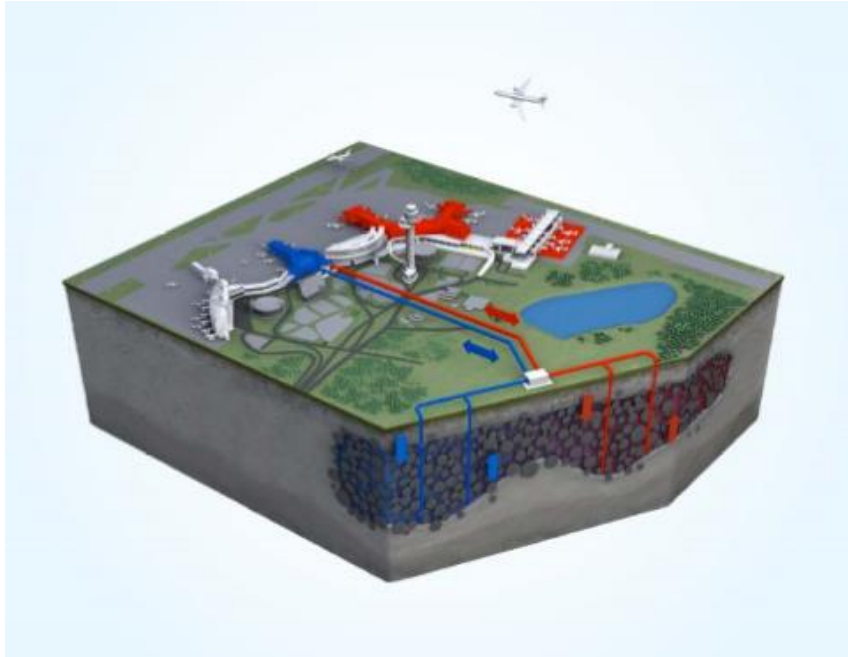


KUVIO 12. Vasemmassa kuvassa jäähdytyskauden kierto kesällä ja oikeassa kuvassa lämmityskauden kierto talvella (Banks 2012, 77)



KUVIO 13. Arlandan ATES-järjestelmän jäähdytyskauden hydraulinen mallinnus (Andersson 2009)

Pohjavesivarasto sijaitsee varsinaisen lentokenttäalueen ulkopuolella Brunkebergsåsenin alueella. Pumppausaseman sijainti lentokenttään nähden on esitetty kuviossa 14 (Wigstrand 2009).



KUVIO 14. Pohjavesivaraston ja pumppausaseman sijainti Arlandan lentokenttään nähden (Wigstrand 2009)

Levylämmönvaihtimien toimittajana toimi Alfa Laval Ab. Toimitettavat mallit olivat Alfa Laval TL35B ja Alfa Laval T20B, jotka on esitetty kuvassa 2. (Slussen 2008; Alfa Laval 2017a; Alfa Laval 2017b.)

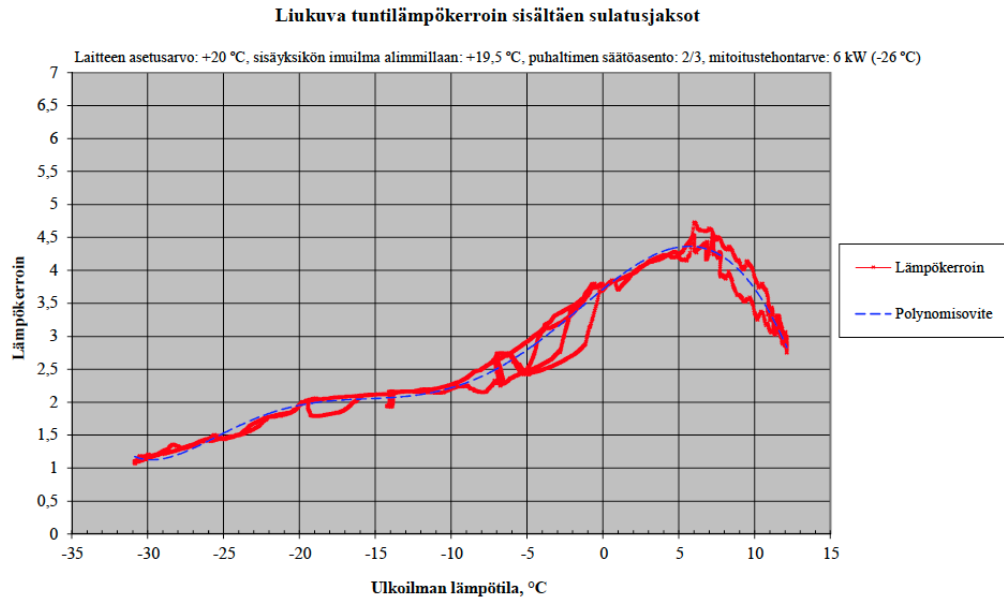


KUVA 2. Alfa Laval Ab:n toimittamat levylämmönvaihtimet Arlandan lentokentälle. Vasemmalla Alfa Laval TL35 ja oikealla Alfa Laval T20. Lämmönvaihtimet ovat teknisiltä tiedoiltaan samankaltaiset. T20B:n putkikoot ovat hieman pienemmät TL35B:hen nähden (Alfa Laval 2017a; Alfa Laval 2017b.)

Järjestelmän pohjaveden kokonaispumppauskapasiteetti on noin $720\text{m}^3/\text{h}$, joka vastaa keskivirtaamaa 200 l/s tunnin aikana. Tällä saadaan lämmityksen ja jäähdytyksen huipputehoksi 8MW ja vuositasolla hyödynnettävä energiamäärä on 20GWh (Wigstrand 2009). Tämä kaikki saadaan aikaan ilman lämpöpumppuja, joten järjestelmän sähkönkulutus koostuu ainoastaan kaivoihin sijoitettujen uppopumppujen ja kiertovesipumppujen vaatimasta energiamäärästä. Järjestelmä onkin varsin energiatehokas ja sen koko lämmitys- ja jäähdytyskautta kuvaava lämpökerroin SPF (Seasonal Performance Factor) on noin 60. Lähtöinvestointi oli noin 5 miljoonaa euroa ja laskennallinen takaisinmaksuaika 5 vuotta, joka on melko lyhyt tämän kokoluokan investoinnissa. Arvioitu säästö sähkönkulutuksessa on noin $4\text{--}5\text{ GWh/a}$ ja kaukolämmön kulutuksessa noin $10\text{--}15\text{GWh/a}$. Hiilidioksidipäästöjen vähennys on arvioitu olevan 7000 tonnia vuodessa. (Wigstrand 2009.)

6.2 Aktiivisen pohjavesijärjestelmän ja ilmalämpöpumppujen vertailu

Pohjavesijärjestelmän selkeänä etuna on, että lämmönlähteenä lämmityskaudella tai lämpönieluna jäähdytyskaudella toimivan pumppauskaivon pohjaveden lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden, joten aktiivijärjestelmässä lämpöpumpun lämpö- ja kylmäkerroin on lähes vakio vuoden ajasta riippumatta (Banks 2012, 172 - 173). Vastaavasti ilmalämpöpumpulla lämpö- ja kylmäkertoimen arvot muuttuvat merkittävästi ulkolämpötilan noustessa tai laskiessa. Ilmalämpöpumpun lämpökertoimen COP_H -arvo on useilla valmistajilla parhaimmillaan lämpötilavälillä $5\text{--}7\text{ }^\circ\text{C}$. Nykyaikaisilla ilmalämpöpumpuilla voi lämpökerroin kyseisessä optimilämpötilassa olla hetkellisesti jopa yli 5, mutta lämpötilan laskiessa alle $0\text{ }^\circ\text{C}$ ilmalämpöpumppujen lämpökerroin laskee merkittävästi. Kuviossa 15 on VTT:n testissä olleen Bosch-ilmalämpöpumpun lämpökertoimen COP_H -kuvaaja lämpötilan suhteen. (ScanOffice 2017.) Kuvaajaan on lisätty matemaattinen funktio (polynomisovite), jonka kuvaaja mukailee lämpöpumpun toteutunutta COP_H -arvoa ulkolämpötilan funktiona.



KUVIO 15. Bosch EHP 6.5 AA/I (sisäyksikkö) + EHP 6.5 AA/O (ulkoyksikkö) -ilmalämpöpumpun testitulokset VTT:n testissä (ScanOffice 2017)

Ilmalämpöpumppujen kylmäkertoimet ovat yhtä lailla riippuvaisia ulkolämpötilasta ja niiden jäähdysteho laskee ulkolämpötilan noustessa. Ilmalämpöpumppujen kylmäkertoimesta COP_c eli EER-arvosta (Energy efficiency ratio) ei ole saatavilla vastaavia testituloksia ulkolämpötilan suhteen, joten jäähdystehoja vertailtaessa tulee käyttää koko jäähdytyskauden keskimääräistä jäähdystehoa kuvaavaa SEER-arvoa (Seasonal energy efficiency ratio). Taulukosta 2 nähdään, että Panasonic Nordic CE 9PKE -ilmalämpöpumpulla kyseinen jäähdytyksen SEER-arvo on 7,25 ja lämmityskauden SCOP-arvo 3,92 (Ilmalämpöpumppu.fi 2017).

TAULUKKO 2. Panasonic Nordic CE 9/12 tekniset tiedot (Ilmalämpöpumppu.fi 2017)

Malli		CE9PKE	CE12PKE
Lämmitysteho	W	800-5100	800-6500
Kylmäteho	W	600-3000	600-4000
Lämpökerroin	COP	4,59	4,12
Vuosihyötysuhde	SCOP/ SEER	3,92/7,25	3,90/7,11
Kosteuden poisto	Max, l/h	1,6	2,0
Äänitaso	Sisä-yksikkö Min/Max, dBA	24-49	25-42
Tilasuositus	m ²	50- 120	70-150
Energialuokka	Lämmitys/ Jäähdytys	A/A++	A/A++

Pohjavesijärjestelmissä käytettävien lämpöpumppujen testitulokset ovat Suomessa toistaiseksi vähäisiä, mutta joillakin ulkomaisilla valmistajilla on kuitenkin saatavilla arvioidut lämpö- ja kylmäkertoimen arvot myös open-loop-järjestelmille. Kuvassa 3 on Energy Starin tehokkuusluokituksen saanut WaterFurnace 7 Series 700A11 -maalämpöpumppu, jonka lämmityksen COP_H -arvoksi Energy Star (2017) ilmoittaa open-loop-järjestelmässä 5,1-5,3 ja jäähdytyksen COP_C eli EER-arvoksi 37,2-42,5. Pohjavesijärjestelmässä lähteen lämpötila on lähes vakio ympäri vuoden, joten myös lämpö- ja kylmäkertoimet pysyvät lähes vakiona. Testitulokset ovat toteutuneet standardin ISO 13256-2 määrittelemissä testiolosuhteissa, jossa lämpökertoimen määrittelyn testiolosuhteissa pumppauskaivolta lämpöpumpulle saapuvan pohjaveden lämpötilaksi on asetettu 10 °C. Kylmäkertoimen määrittelyssä lämpötila on vastaavasti 15 °C. (ISO 13256-2:1998, 5; WaterFurnace 2017.)



KUVA 3. WaterFurnace Series 700A11 -maalämpöpumppu ohjausyksiköineen (Energy Star 2017)

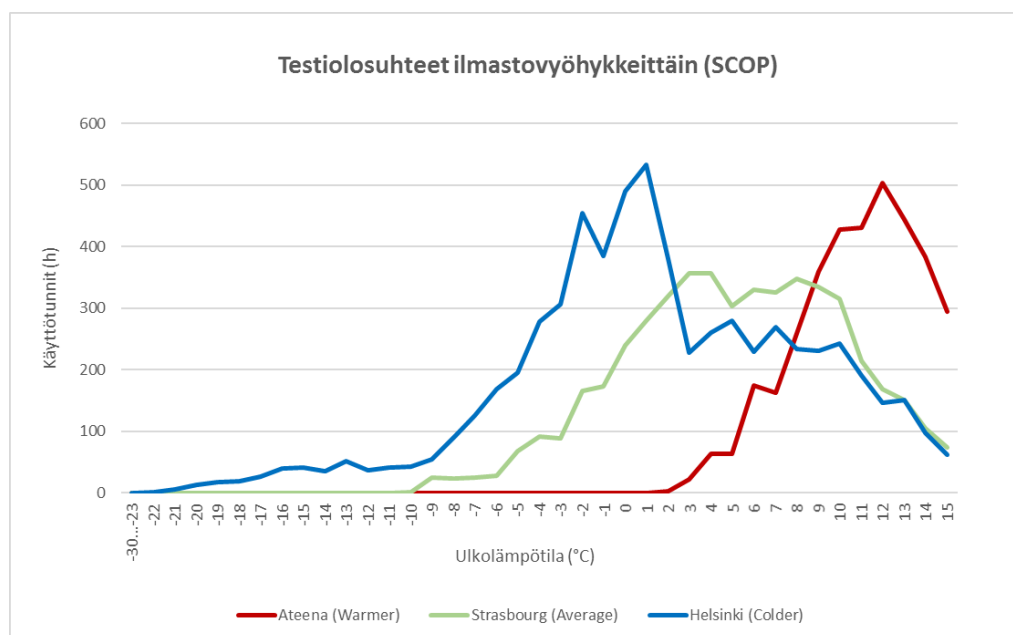
Energy Star on esittänyt Aurora säätimellä varustetuille WaterFurnace Series 7 malleille tarkat lämpö- ja kylmäkertoimet. Mallikohtaiset arvot on esitetty taulukossa 3 (Energy Star 2017).

TAULUKKO 3. WaterFurnace 7 Series 700A11 -mallien tehokertoimet
(Energy Star 2017)

Model Number	Configuration	Capacity	Energy Use:		Annual Energy Use	Annual Cost (National Average)*	Lifetime Cost to Operate**	% Saving over Federal Minimum
			EER	COP				
NVV036A1*1	Closed Loop	36,000	29.5	4.4	1,946	\$212	\$3,182	53%
NVH036A1*1								
NVV048A1*1		46,000	31.4	4.5	2,381	\$260	\$3,894	55%
NVH048A1*1								
NVV060A1*1		56,000	27.7	4.3	3,164	\$345	\$5,174	51%
NVH060A1*1								
NVV036A1*1	Open Loop	38,000	39.4	5.3	1,617	\$176	\$2,644	63%
NVH036A1*1								
NVV048A1*1		49,000	42.5	5.1	2,050	\$223	\$3,352	63%
NVH048A1*1								
NVV060A1*1		60,000	37.2	5.2	2,654	\$289	\$4,339	61%
NVH060A1*1								

Kuten taulukoista 2 ja 3 voidaan todeta, ero lämpöpumppujärjestelmien välillä on suuri etenkin kylmäkerroin osalta. WaterFurnace Series 700A11 open-loop-järjestelmän kylmäkerroin on Energy Starin (2017) mukaan 37,2-42,5, kun taas Panasonic Nordic CE 9 ja 12 -ilmalämpöpumpuissa jäähdytyskauden kylmäkerroin SEER on 7,11 ja 7,25. Myös lämmityskauden lämpökerroin on suurempi tarkasteltavassa open-loop-järjestelmässä, sillä kyseisillä ilmalämpöpumpuilla SCOP arvo on 3,9 ja vastavasti WaterFurnacen open-loop-järjestelmässä lämpökerroin $COP_H = 5,1-5,3$.

Ilmalämpöpumpuilla SCOP-arvojen määrittämisessä käytettävät ulkolämpötilat ja käyttötunnit on määritelty standardissa SFS-EN 14825. Lisäksi testiolosuhteet on jaettu kolmeen ilmastovyöhykkeeseen: Helsinki (Colder), Strasbourg (Average) ja Ateena (Warmer). Määritetty SCOP-arvo riippuu siis täysin käytettävästä ilmastovyöhykkeestä, joten tämä tulisi myös tietää suoritettaessa vertailua testitulosten välillä. Kuviossa 16 on standardin SFS-EN 14825 määrittelemien ilmalämpöpumppujen testiolosuhteiden mukaan laadittu kaavio eri ilmastovyöhykkeiden lämmityksen käyttötunneista eri ulkolämpötilan arvoilla. (SFS-EN 14825:2016, 56-57.) Kuvaajassa on esitettyä käyttötunnit ulkolämpötilan funktiona.

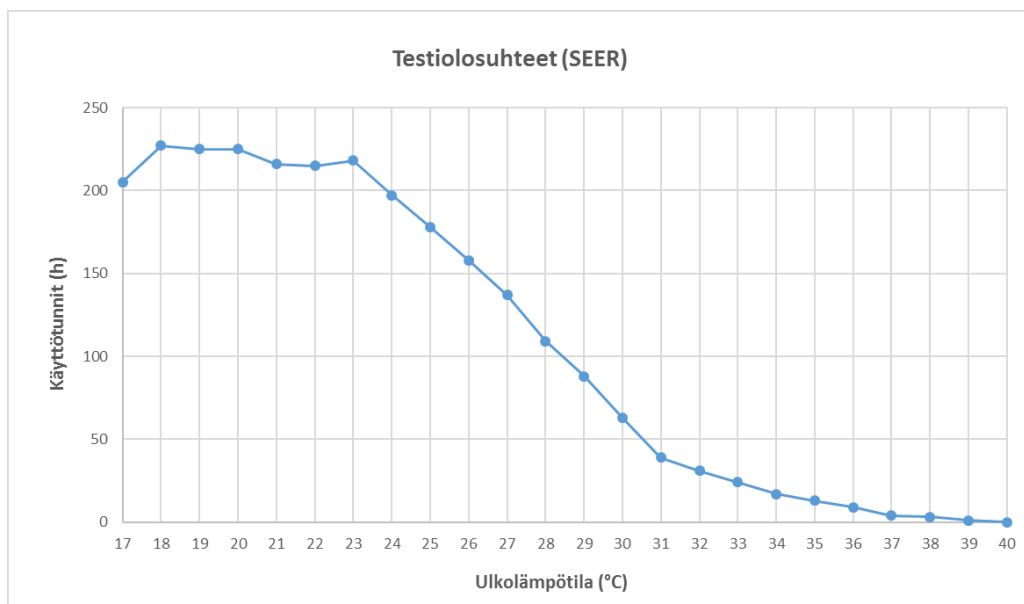


KUVIO 16. Standardin SFS-EN 14825 mukaiset ilmalämpöpumppujen testiolosuhteet eri ilmastovyöhykkeillä SCOP–arvon määrittämisessä (SFS-EN 14825:2016, 56-57)

Esimerkiksi Helsingin vyöhykkeellä suurimmat testauksen käyttötunnit (>200 h) ovat välillä -4 °C...+10 °C ja eniten käyttötunteja lämpötilassa 1 °C (533 h). Vastaavasti Ateenan vyöhykkeellä suurimmat käyttötunnit ovat lämpötilan arvolla 12 °C (503 h). (SFS-EN 14825:2016, 56-57.) Kylmempien jaksojen pidentyessä voi määritetty SCOP-arvo pienentyä ja ero verrattavaan open-loop-järjestelmään kasvaa. Vastaavasti ulkolämpötilan ollessa oletettua korkeampi lämmityskauden aikana, on muutos päinvastainen.

Lämpimien talvijaksojen aikana ero lämmityksen käyttökustannuksien järjestelmien välillä siis pienenee. Sama tapahtuu myös jäähdytyksen osalta viileinä kesäjaksoina, mutta ero jäähdytyksen osalta on joka tapauksessa huomattavasti suurempi open-loop-järjestelmän eduksi kuin lämmitysjärjestelmässä. Myös ilmalämpöpumppujen SEER-arvojen määrittämisessä käytettävät ulkolämpötilat ja käyttötunnit on määritetty standardissa SFS-EN 14825. SEER–arvon testaukselle ei ole standardissa laadittu erillistä

vyöhykejako, vaan testaus tapahtuu jäähdytykselle asetetuissa referenssiolosuhteissa. Kuviossa 17 on esitetty standardin SFS-EN 14825 mukaiset SEER–arvon testauksen aikaiset lämpöpumpun käyttötunnit ulkolämpötilan funktiona. (SFS-EN 14825:2016, 67.) Kuvaajassa on esitettynä käyttötunnit ulkolämpötilan funktiona.



KUVIO 17. Standardin SFS-EN 14825 mukaiset ilmalämpöpumpun SEER-arvon määrittämisen testiolosuhteet (SFS-EN 14825:2016, 67)

Jäähdytyksen osalta suurimmat testauksen käyttötunnit (>200 h) ovat lämpötilavälillä 17 °C...23 °C ja jäähdytyskauden ulkolämpötilan noustessa tämän yläpuolelle suurimpien käyttötuntien osalta laskee myös SEER–arvo määritetyn testiarvon alapuolelle (SFS-EN 14825:2016, 67). Tällöin ero kylmäkertoimen arvossa kasvaa verrattavaan open-loop-järjestelmään nähden, jossa kylmäkerroin ei laske ulkolämpötilan noustessa (lämmönlähteen lämpötila lähes vakio).

6.3 Aktiivisen pohjavesijärjestelmän ja maalämpöpumppujen vertailu

Erot lämpö- ja kylmäkertoimissa open-loop- ja closed-loop-järjestelmien välillä syntyvät lämmityskaudella lämmönlähteen tai vastaavasti jäähdytyskaudella lämpönielun lämpötilasta eli lämpötilaerosta $\Delta T = T_{\text{sisä}} - T_{\text{lähde}}$

sekä lämmönsiirron tehokkuudesta ulkoisesta järjestelmästä sisäiseen järjestelmään. Jos lähteen lämpötila on alhainen lämmityskaudella, on myös lämpöpumpun energiankulutus suurempi ja tällöin myös COP_H -arvo laskee. Pohjaveden lämpötila on lämmityskauden aikana usein hieman korkeampi kuin maalämpökaivon tai vaaka-asennuksessa maaperän pintakerrosten lämpötila ja lisäksi lämmönsiirto ulkoisesta järjestelmästä sisäiseen järjestelmään on tehokkaampaa avoimessa kierrossa. Suljetussa kierrossa lämpö siirtyy ensin maaperästä lämmönkeruuputkistossa kiertävään lämmönsiirtonesteeseen, joka vapauttaa vastaanottamansa lämpöenergian edelleen lämpöpumpun sisäiseen kiertoon.

Ylimääräiset lämmönsiirtovaiheet laskevat lämmönsiirron tehokkuutta ja lisäksi maalämpöjärjestelmä palautuu hitaammin lämmityskauden kuormituksesta. Kun lämpökaivosta siirtyy lämmityskaudella lämpöenergiaa enemmän pois kuin tulee tilalle, muuttuu kaivon energiatase negatiiviseksi ja se alkaa jäähtyä, joka laskee COP_H -arvoa lämpötilaeron kasvaessa sisäisen ja ulkoisen järjestelmän välillä. Pahimmassa tapauksessa maalämpökaivo voi jopa jäätyä liian nopean jäähtymisen johdosta. Avoimessa kierrossa pohjavettä virtaa pumppauskaivoon samassa suhteessa pumppattavan vesimäärän kanssa, kun kaivon antoisuus on riittävä. Kun pohjaveden lämpötila on vakio, myös saapuvan lämpöenergian määrä kaivoon on sama kuin kaivosta poistuvan lämpöenergian määrä ja energiatase ei muutu eli $Q_{in} - Q_{out} = 0$. Tällöin lämmönlähteenä toimiva pumppauskaivo ei jäähdy ja lämpökerroin COP_H pysyy lähes vakiona. Kuten alaluvun 6.2 taulukosta 3 voidaan havaita, on esimerkiksi WaterFurnace 7-sarjan lämpöpumpuilla lämpökerroin hieman suurempi avoimessa kierrossa.

Myös maalämpöpumppujen testitulokset vaihtelevat valmistajasta ja testiolosuhteista riippuen, eivätkä standardien mukaan suoritettujen testitkään ole aina yksikäsitteisiä. Esimerkiksi Suomessa yleisesti käytettävässä standardissa SFS-EN 14511-2 on määritetty testiolosuhteet eri lämpöpumpun lämmönlähteille. Maalämmön tapauksessa lämmönlähteenä on maaperä tai kallio (brine), joka on standardin mukaan testilämpötilaltaan 0 °C . Vastaavasti pohjavedelle vastaava luku on 10 °C ja lämmitettävän rakennuk-

sen sisälämpötilaksi on määritetty 20 °C. Vesikiertoisien järjestelmän käyttölämpötilat voivat olla joko 35 °C, 45 °C tai 55 °C ja mittaukset voidaan suorittaa myös osakuorman menetelmällä. Tällöin mittaukset suoritetaan standardin SFS-EN 14825 mukaisesti ulkolämpötilan arvoilla -7 °C, +2 °C, +7 °C ja +12 °C. Maaperän ollessa lämmönlähteenä on lähteen lämpötilaksi määritetty 0 °C ja palautuslämpötilaksi -3 °C, jolloin lämmönsiirtoneste tulisi saapua lämpökaivolta tai vaaka-asennetulta lämmönkeruuputkistolta lämpöpumpulle lämpötilassa 0 °C ja poistua lämpöpumpulta lämpötilassa -3 °C lämmitysjärjestelmässä. (SFS-EN 14511-2:2013, 10-11 & SFS-EN 14825:2016, 26-28.) Standardista SFS-EN 14825 tai valmistajien julkaisemista testituloksista ei kuitenkaan käy ilmi, miten ulkolämpötilan odotetaan vaikuttavan lämmönlähteen eli lämpökaivon, lämmönkeruuputkiston tai pohjaveden lämpötilaan. Myöskään maaperävaatimuksia ei standardissa ole määritetty. (SFS-EN 14825:2016.) Tämä jättää mahdollisuuden eriäville testituloksille. Esimerkiksi Oilon Oy on esittänyt maalämpöpumppujen testitulokset tämän standardin mukaisesti. Maalämpöpumppumallin GT16 osakuorman testitulokset on esitetty taulukossa 4 (Oilon 2017).

TAULUKKO 4. Oilon GT16 -maalämpöpumppu. Testitulokset.

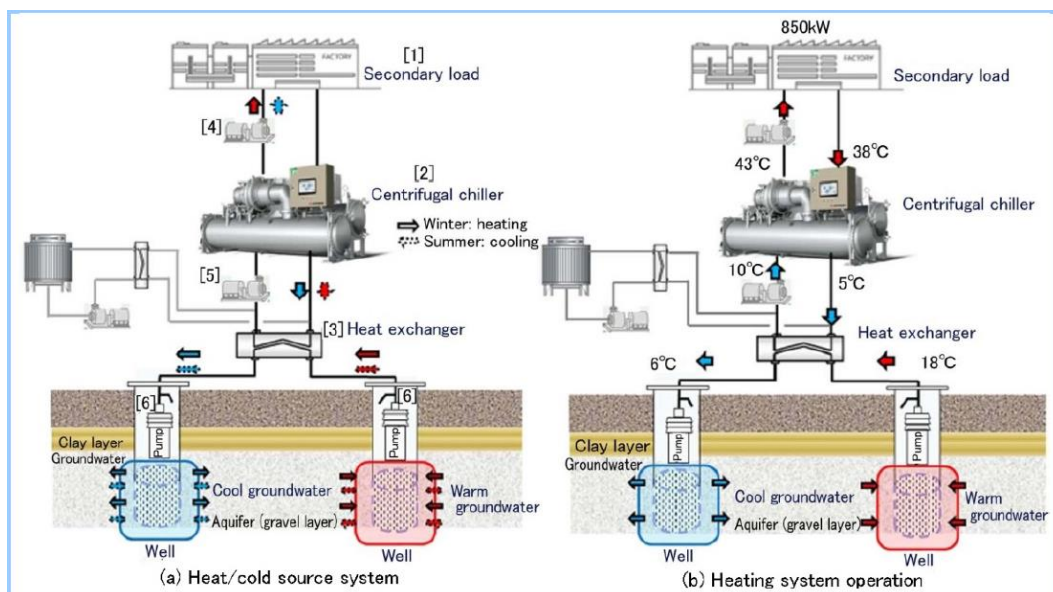
ILMOITETTU LÄMPÖKERROIN OSAKUORMALLA SISÄLÄMPÖTILASSA 20 °C JA ALLA MAINITUSSA ULKOLÄMPÖTILASSA			
ulkolämpötila -7 °C, menovesi 52 °C	COPd	-	2,97
ulkolämpötila +2 °C, menovesi 42 °C	COPd	-	3,87
ulkolämpötila +7 °C menovesi 36 °C	COPd	-	4,41
ulkolämpötila +12 °C menovesi 30 °C	COPd	-	4,95
ulkolämpötila -7 °C menovesi 55 °C	COPd	-	2,70

Kuten taulukosta 4 nähdään, myöskään menoveden lämpötila ei ole vakio. Vastaavia arvoja ei rajata tarkasti kummassakaan standardissa. Standardin SFS-EN 14511-2 mukaan maalämpöjärjestelmässä (brine to water) tulisi lähteen lämpötilan olla 0 °C ja vesikiertoisessa lämmityksessä rakennuksen sisäisen kierron veden lämpötila joko 35 °C, 45 °C tai 55 °C (SFS-EN 14511-2:2013, 10-11). Mitä pienemmän sisäisen kierron lämpötilan valitsee, sitä korkeampi on lämmityksen COP_H-arvo. Tällä tavoin voi syn-

tyä eroja mittaustavasta riippuen. Toisaalta voi olla myös perusteltua ilmoittaa lämpökerroin sisäisen kierron lämpötilassa 35 °C, koska tätä käytetään vesikiertoisen lattialämmityksen mitoituslämpötilana ja usein maalämpöpumput on kytketty juuri kyseisenlaisiin järjestelmiin. Joka tapauksessa tarkempaa rajausta käytettyihin arvoihin ja testiolosuhteisiin tarvittaisiin yksiselitteistä vertailua varten.

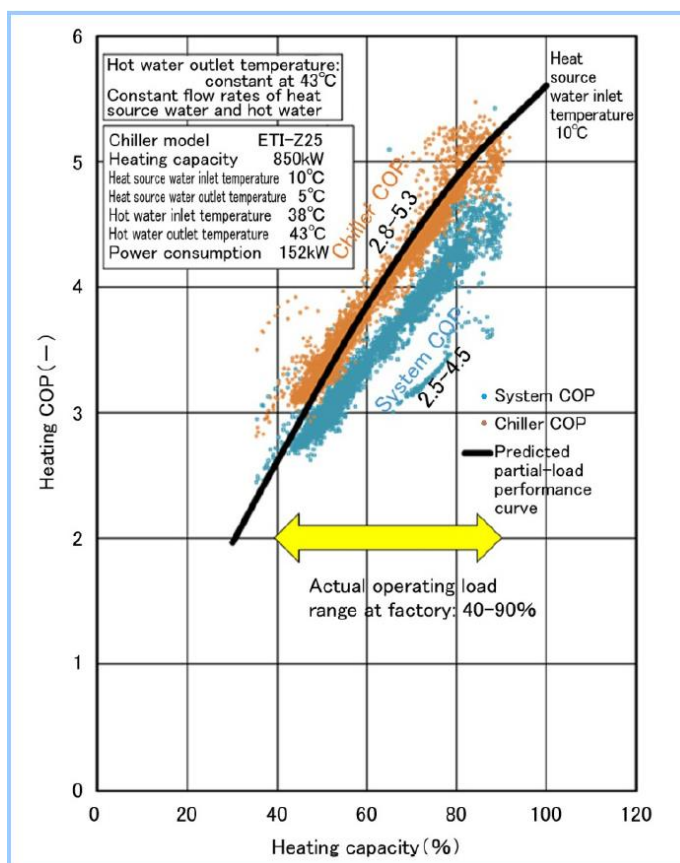
6.4 Mitsubishiin testitulokset pohjavesijärjestelmälle

Mitsubishi on julkaissut vuodelta 2017 oman pohjaveden kausivarastointiin perustuvan jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmän testitulokset. Järjestelmä on saman tyyppinen kuin Arlandan lentokentällä, mutta passiivisen järjestelmän sijaan käytössä on aktiivinen järjestelmä. Pohjavesivarastosta sisäiseen järjestelmään siirretty lämpö ohjataan lämmönsiirtonesteen välityksellä keskipakoiseen lämpöpumppuun, jossa lämmityskauden aikana vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän vesi lämmitetään lämpötilaan 43 °C ja palautetaan lämpöpumpulle lämpötilassa 38 °C. Lämpökaivosta pumpattavan pohjaveden lämpötila on 18 °C, josta lämpöä siirtyy sisäiseen järjestelmään lämmönvaihtimen välityksellä lämpötilaerotuksen $\Delta T = 12$ °C verran ja tämän jälkeen vesi palautetaan kylmäpuolen kaivoon kausivarastointiin lämpötilassa 6 °C. Lämmönvaihtimelta lämpöpumpulle saapuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila on 10 °C, jossa lämpöä siirretään rakennuksen vesikiertoiseen lämmitykseen lämpötilaerotuksen $\Delta T = 5$ °C verran ja lämmönsiirtoneste palaa lämmönvaihtimelle lämpötilassa 5 °C. Kuviossa 18 on esitetty kyseisen Mitsubishiin järjestelmän lämmityskauden toimintakaavio. (Sakai ym. 2017.)



KUVIO 18. Mitsubishin pohjavesijärjestelmän toimintakaavio, oikeassa kuvassa lämmityskauden tulo- ja lähtölämpötilat (Sakai ym. 2017)

Tarkasteltaessa tilannetta lämmönvaihtimen jälkeen on tilanne lähes vastaava kuin standardien ISO 13256-2 ja SFS-EN 14511-2 mukaisissa open-loop-pohjavesijärjestelmän testiolosuhteissa. Lämmönlähteen eli pohjaveden lämpötilaksi on molemmissa standardeissa määritetty lämmityskaudella 10 °C ja standardissa SFS-EN 14511-2 lämpöpumpulta palaavan veden lämpötila on 7 °C. Mitsubishin järjestelmässä tilanne on muuten sama, mutta testin aikana lämpöpumpulta palaavan nesteen lämpötila oli 5 °C. Standardissa ISO 13256-2 paluuveden lämpötila riippuu valmistajan määrittämästä pumppaustaajuudesta (l/s). Mitsubishin keskipakoiselle lämpöpumpun testauksessa käytetyt testiolosuhteet ovat lähellä standardeissa ISO 13256-2 ja SFS-EN 14511-2 määritettyjä testiolosuhteita ja täten kyseisen testin tuloksia voidaan hyödyntää aikaisempien tulosten tarkastelussa. (ISO 13256-2:1998, 5; SFS-EN 14511-2:2013, 10-11.) Järjestelmään lisätty lämmönvaihdin heikentää kokonaislämpökerrointa, eikä koko järjestelmän lämpökerroin ole vertailukelpoinen aikaisemmin käsiteltyjen tulosten kanssa. Täten tämän työn yhteydessä keskitytään varsinaisen lämpöpumpun lämpökertoimeen. Kuviossa 19 on esitetty lämpöpumpun ja koko järjestelmän lämpökertoimet Mitsubishin testin aikana eri kuormituksilla (Sakai ym. 2017).



KUVIO 19. Lämmityksen COP_H -arvot Mitsubishin testissä (Sakai ym. 2017)

Tarkastelussa on huomioitava myös rakennuksen vesikiertoisen järjestelmän käyttölämpötila. Esimerkiksi standardin SFS-EN 14511-2 mukaan vastaavan water-water -järjestelmän testiolosuhteissa (medium temperature) W10/W45 saapuvan veden lämpötila on 45 °C ja järjestelmästä palaavan veden 40 °C (SFS-EN 14511-2:2013, 10-11). Vastaavasti standardissa ISO 13256-2 on määritetty vain rakennuksen sisäisen vesikiertoisen järjestelmän lämpötila lämpökertoimen määrittämiseksi, joka on 40 °C (ISO 13256-2:1998, 5). Mitsubishin testissä rakennukseen saapuvan veden lämpötila oli 43 °C ja palaavan veden 38 °C. Rakennuksen sisäisen kierron lämpötila on lähellä molempia standardeja ja lämpötilan muutos ΔT on sama kuin standardissa SFS-EN 14511-2, joten olosuhteita voidaan pitää vertailukelpoisina (SFS-EN 14511-2:2013, 10-11). Kuvion 19 kuvasta nähdään, että lämmitystehoa nostettaessa yli 80%:iin kokonaiskapasiteetista (850 kW) nousee myös lämpöpumpun lämpökerroin ja korkein mitattu arvo oli $COP_H = 5,3$. Koko järjestelmän lämpökerroin oli 4,77, kun

rakennuksen tuloveden käyttölämpötila (43 °C) oli saavutettu ja järjestelmä toimi vakioteholla (81 % kokonaistehosta). Jäähdytysjärjestelmän testit alkavat raportin mukaan kesällä 2017 (Sakai ym. 2017). Lämmityksen osalta olosuhteissa W10/W45 on tulos hieman korkeampi kuin aluvun 4.2 kuvion 7 kuvaajalta luettava arvo vastaavissa olosuhteissa. Lämpöpumpun COP_H arvo 80 %:n käyttöteholla on vastaava kuin WaterFurnace 7 series -sarjan lämpöpumpuille taulukossa 3 ilmoitettu arvo.

6.5 Open-loop-järjestelmän suunnittelu ja mitoitus

GTK:n asiantuntijan Teppo Arolan (2017) mukaan maaperän rakenne tulee selvittää, jotta voidaan tehdä simulaatio pohjaveden kulkeutumisesta ja virtaussuunnista sekä pintaveden kulkeutumisesta pohjaveteen. Pintaveden suotautumiseen vaikuttaa maa-aineksen raekoko. Isomman raekoon maa-aineksesta suotautuminen on nopeampaa, kun taas esimerkiksi savi on huonosti vettä läpäisevää ja voi synnyttää orsivesikerroksia. Kun virtaussuunta ja pohjaveden lämpötilatasot tiedetään, voidaan suunnitella kaivojen paikat tehokkaasti. Tämän jälkeen tulee selvittää lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve mahdollisimman tarkasti, mieluiten päivä- tai jopa tuntitasolla. Kun kaivojen paikat on määritetty ja kulutustasot tiedetään, voidaan arvioida vuosi-, kuukausi-, päivä-, ja tuntikohtainen keskivirtaama energiantarpeen kattamiseksi alaluvussa 4.3 esitettyjen kaavojen 5 ja 6 avulla.

Näiden tietojen pohjalta mitoitetaan pumppauskoe pohjaveden antoisuuden määrittämiseksi ja selvitetään pohjavesivaraston luontainen kyky palautua pumppauksen aiheuttamasta veden poistumasta. Toiminnan hydrologisia vaikutuksia ympäröivään pohjavesivarastoon voidaan tarkkailla seurantakaivojen avulla. (Arola 2017.) Järjestelmässä, jossa lämmöntalteenotossa käytettyä vettä ei imeytetä kausivarastoon, on vedenpinnan palautuminen lähtötasolle riippuvainen sen luontaisesta virtaamasta ja pintavesien johtumisesta pohjavesikerrokseen.

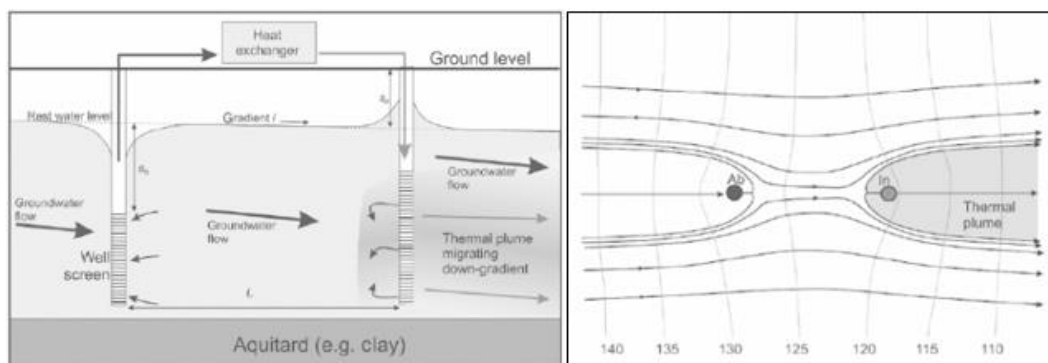
Lämmitysjärjestelmässä lämpimän puolen pumppauskaivot, josta pohjavettä pumpataan, asetetaan pohjaveden tulosuuntaan (ylävirran suuntaan) ja järjestelmästä palaava, viilentynyt vesi johdetaan riittävän kauas pohjaveden virtaussuuntaan (alavirran puolelle). Tällöin viilentynyt pohjavesi ei pääse sekoittumaan haitallisessa määrin ylävirran pumppauskaivon normaalilämpöisen pohjaveden kanssa, vaan virtaa virtaussuunnan mukaisesti kaivoista poispäin. Kun käytetään lämmin- ja kylmävarastoa, tulee etäisyys pumppauskaivojen välillä olla riittävä, ettei lämpötilat pääse tasaantumaan lämmitys ja viilennyspuolen välillä. (Arola 2017.)

Lisäksi pumppauskaivojen ja käytetyn veden palautuskaivojen etäisyyden tulee olla riittävä, vaikka hydrologisten olosuhteiden perusteella pois johdettava vesi virtaisikin poispäin pumppauskaivosta. Kaavassa 7 on esitetty kaivojen mitoituksessa käytettävä minimietäisyys pumppauskaivon ja palautuskaivon välille. (Banks 2012, 227 - 230.)

$$L = \frac{2Z}{T\pi i} \quad (7)$$

, jossa Z on virtaama (l/s), T on akviferin (pohjavesivarasto) transmissiivisyys (m^2/s) ja i on luonnollinen hydraulinen gradientti (paine korkeus (m) / suotomatka (m)) (Banks 2012, 229).

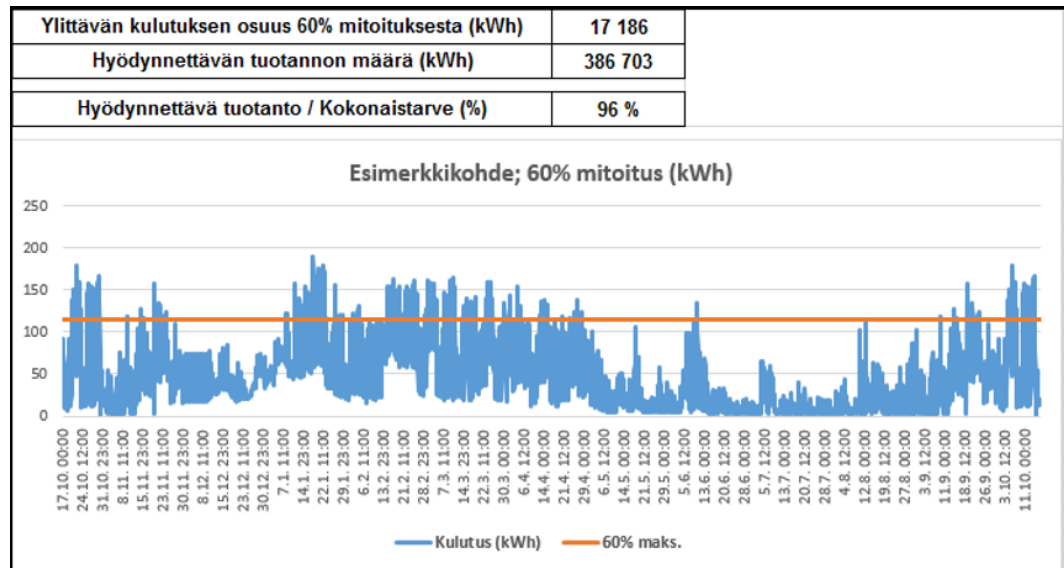
Kuviossa 20 on esimerkki pumppauskaivon ja palautuskaivon sijoituksesta siten, että pumppauskaivo on sijoitettu korkeamman luonnollisen hydraulisen gradientin kohtaan ja kaivojen etäisyys $L > 2Z/T\pi i$. Tällöin hydraulista tai termistä palautumista ei tapahdu palautuskaivosta pumppauskaivon suuntaan. (Banks 2012, 227 - 230.)



KUVIO 20. Pumppauskaivon (Ab) ja palautuskaivon (In) etäisyys $L > 2Z/\pi$, vasemmassa poikkileikkauskuva ja oikealla asemakuva (Banks 2012, 228)

Varsinaisessa pumppauskokeessa mitataan pumpattavan pohjaveden määrä aikayksikössä ja pumppauksen aiheuttama vedenpinnan alenema pumppauskaivossa ja sen ympäristössä (pohjavesiputkista). Kun pumppaus lopetetaan, jatketaan mittauksia siten, että niillä voidaan todeta pohjavedenpinnan palautumiseen kulunut aika. Näistä arvoista voidaan laskea maakerroksen vedenantoisuudet. (Arola 2017.) Pohjavesijärjestelmissä on Arola (2017) käyttänyt yleisesti lämmitysjärjestelmien lämpökertoimen $COP_H = 4$ ja jäähdytysjärjestelmien kylmäkertoimen $COP_C = 25-30$. Tämä on tällä hetkellä paras saatavilla oleva tieto, joten tässä työssä sovelletaan kyseisiä arvoja laskennan osalta.

Arolan (2017) mukaan geoenergia on kustannustehokkainta mitoittaa peruskuormalle; normaalisti noin 50-60 % maksimitehosta. Kuviossa 21 on esimerkki pohjavesijärjestelmän mitoituksesta, kun järjestelmän teho on 60% maksimitehontarpeesta. Tällöin pohjavesijärjestelmän lämpöenergiantuotanto kattaisi n. 96% kokonaislämpöenergiantarpeesta esimerkin kulutustiedoilla. Esimerkissä on käytetty mallina kiinteistön X toteutuneita kulutustietoja ja arvot ovat aina tapauskohtaisia. Kohteen lämpöenergian kulutuksen jakautuminen vuositason vaikuttaa hyödynnettävän tuotannon osuuteen eli laskelmien arvoja ei voida suoraan kopioida eri kohteiden välillä.



KUVIO 21. Kiinteistön X tuntikohtainen lämpöenergiankulutus ja järjestelmän energiantuotantokapasiteetti, kun mitoitus on 60% vuoden maksimilämmitystehon tarpeesta

Kun lämpöenergiantarve tiedetään, voidaan laskea lämmitysjärjestelmän pohjaveden virtausmäärät 60%:n mitoituksella pumppauskoetta varten. Alaluvussa 4.3 esitetyn kaavan 6 avulla voidaan esittää ympäristöstä pumppattavan lämpömäärän teho G kaavan 8 mukaisesti.

$$G = H * \frac{1}{1 - \frac{1}{COP_H}} \quad (8)$$

, jossa H on lämmitysvaikutus (W) ja COP_H on lämpökerroin.

Koska lämmitysteho $P = W/t$, voidaan kaava 7 johtaa kaavan 9 muotoon.

$$\frac{Q_{\text{ympäristö}}}{t} = \frac{Q_{\text{lämmitys}}}{t} * \frac{1}{1 - \frac{1}{COP_H}} \quad (9)$$

eli
$$Q_{\text{ympäristö}} = Q_{\text{lämmitys}} * \frac{1}{1 - \frac{1}{COP_H}},$$

jossa $Q_{\text{ympäristö}}$ on lämmönlähteestä siirrettävä lämpömäärä (J) ja $Q_{\text{lämmitys}}$ on lämmitettävään kohteeseen siirrettävä lämpömäärä (J).

Kaavan 9 avulla voidaan lämpöenergiankulutustietojen avulla laskea lämmönlähteestä siirrettävän lämpöenergian määrä. Tämän avulla voidaan laskea kyseisen lämpömäärän vaatima veden määrä m_{vesi} tietyllä lämpötilan muutoksella kaavan 10 mukaisesti.

$$m_{\text{vesi}} * c_{\text{vesi}} * \Delta T = Q_{\text{lämmitys}} * \frac{1}{1 - \frac{1}{\text{COP}_H}} \quad (10)$$

$$\text{eli} \quad m_{\text{vesi}} = \frac{Q_{\text{lämmitys}} * \frac{1}{1 - \frac{1}{\text{COP}_H}}}{c_{\text{vesi}} * \Delta T},$$

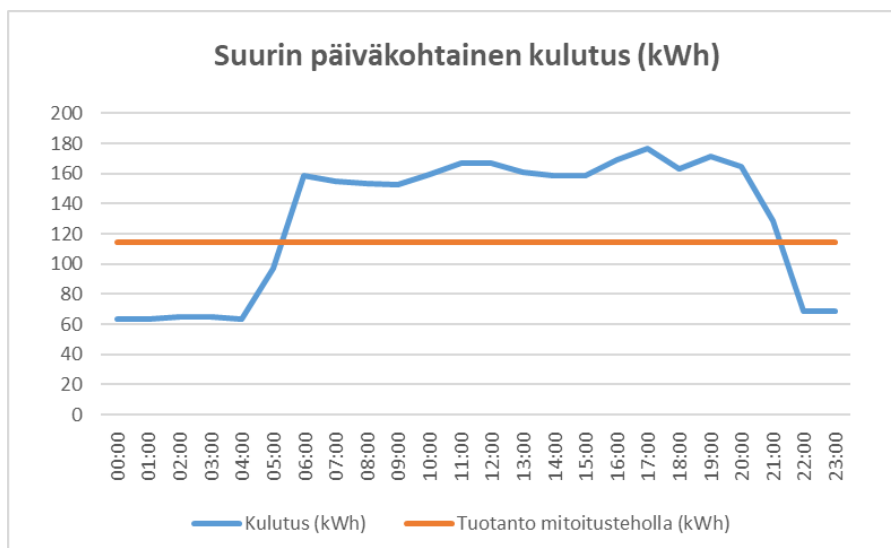
jossa m_{vesi} on veden massa (kg), c_{vesi} on veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/K*kg) ja ΔT on lämmönsiirron aikana tapahtuva veden lämpötilan muutos (K).

Tämän avulla voidaan laskea energiantarvetta vastaavat veden virtausmäärät pohjavesijärjestelmässä tunti-, päivä-, kuukausi- ja vuositasolla. Ensimmäiseksi tarkastellaan virtaamaa maksimituntikulutuksen osalta taulukon 5 mukaisesti.

TAULUKKO 5. Laskennallinen pohjaveden pumppausmäärä tunnissa, kun lämmitystehon mitoitus on 60% maksimitehosta

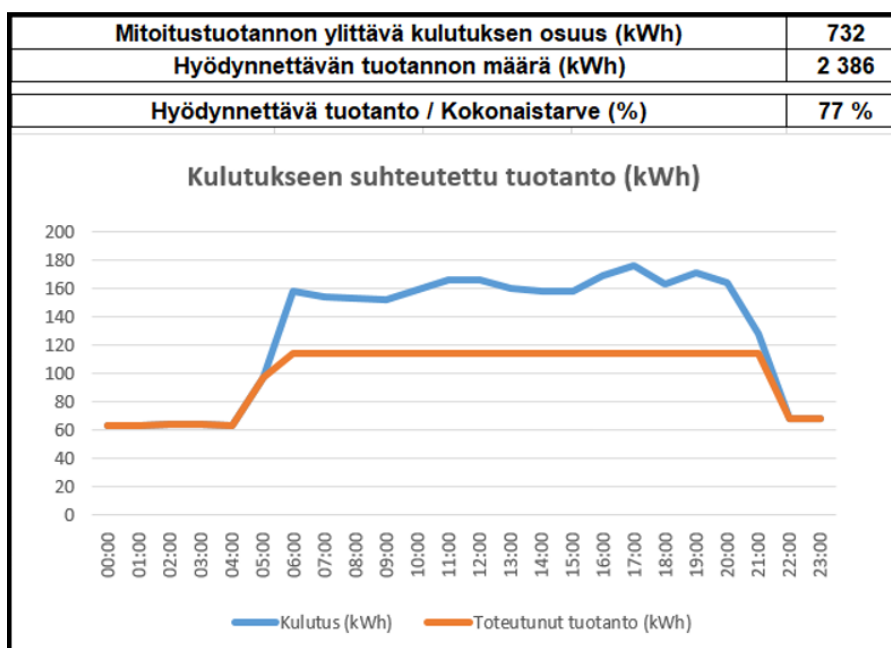
Suurin tuntikulutus (kWh)	190,8
Tuotanto 60% mitoitusteholla (kWh)	114,5
Tuotanto 60% mitoitusteholla (kJ)	412 128
m (kg) / h	10 539
V (m³) / h	11
Keskivirtaama (l/s)	2,9
Keskiteho (kW)	114,5

Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta päivätasolla. Kun suurimman päiväkulutuksen taso on löydetty, voidaan verrata energiantarvetta mitoitustehoon. Kuviossa 22 on esitetty graafinen vertailu näiden tekijöiden välillä.



KUVIO 22. Lämpöenergian kulutus suurimman päiväkulutuksen hetkellä verrattuna mitoitusteholla tuotettavan lämpöenergian määrään

Kulutus on hetkittäin alle mitoitustehon, joten pumppausmäärät tulee suhteuttaa vastaamaan kulutusta kuvion 23 mukaisesti.



KUVIO 23. Lämpöenergian tuotantomäärä suhteutettuna kulutukseen mitoitustehon maksimiarvon ollessa 60% vuoden maksimilämmitystehon tarpeesta

Näillä arvoilla voidaan laskea suurimman päiväkulutuksen aikainen pumppausmäärä, jolla mitoitusstehon mukainen lämpöenergian tuotantomäärä toteutuu taulukon 6 mukaisesti.

TAULUKKO 6. Laskennallinen pohjaveden pumppausmäärä päivässä suurimman päiväkulutuksen hetkellä

Suurin päiväkulutus (kWh)	3118
Tuotanto (kWh)	2 386
Tuotanto (kJ)	8 589 888
m (kg) / d	219 653
V (m³) / d	220
Keskivirtaama (l/s)	2,5
Keskiteho (kW)	99,4

Vastaavalla tavalla voidaan arvioida kokonaispumppausmääriä myös kuukausi- tai vuositasolla ja mitoittaa näiden tietojen perusteella pumppauskokeen pumppausmäärät tietyssä aikayksikössä vastaamaan arvioitua lämpöenergian tarvetta.

7 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Kuten aikaisemmin on todettu, pohjavesi- ja maalämpöjärjestelmillä voidaan vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista lämmitysenergian lähteenä. Ainoa energiankulutus syntyy vesipumppujen ja lämpöpumppujen vaatimasta sähköenergian määrästä, joten laskennalliset päästöt ovat riippuvaisia sähkön tuotantomuodosta. Esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimalla tuotettua sähköä käytettäessä voitaisiin puhua lähes päästöttömästä lämmitysmuodosta. Pohjavesijärjestelmässä on kuitenkin ympäristöriskejä, jotka tulee tiedostaa ja arvioida järjestelmän suunnitteluvaiheessa. Maankäytön historia tulee olla tiedossa ja selvittää mahdollinen maaperän pilaantuneisuus. Mikäli kyseessä on pilaantunut maa-alue, vaaditaan suunnittelussa erityistä tarkkuutta. Haastattelun yhteydessä GTK:n Teppo Arola (2017) totesi pohjavesijärjestelmän olevan mahdollista asentaa myös PIMA-alueelle, mutta tällöin tulee selvittää veden kemiallinen koostumus ja sen sisältämät haitta-aineet. Tärkeää on varmistaa, ettei toiminta heikennä alueen luonnollista tilaa ja aiheuta pilaantuneen pohjaveden leviämistä laajemmalle alueelle.

Yksi pilaantuneen pohjaveden suojelukeino on toteuttaa ns. suojapumppaus. Suojapumppauksella voidaan vettä kunnostaa käsittelemällä ja lisäksi sillä estetään haitta-aineiden leviäminen laajemmalle pohjaveden virtauksen mukana. Suojapumppauksen yhteydessä voidaan helposti hyödyntää pohjavedestä myös energiaa. Pohjavettä voidaan kunnostaa myös mikrobeilla, jossa pohjaveteen syötetään haitta-aineita ”popsivia” ja hajottavia mikrobia. Pohjaveden energiahyödyntämisellä voidaan säätää pohjaveden lämpötilaa mikrobeille suotuisaksi. Näin ollen pohjavesienergian käyttö pilaantuneiden pohjavesien alueella voi myös muodostaa merkittävän taloudellisen ja ympäristöllisen lisäedun. (Arola 2017.)

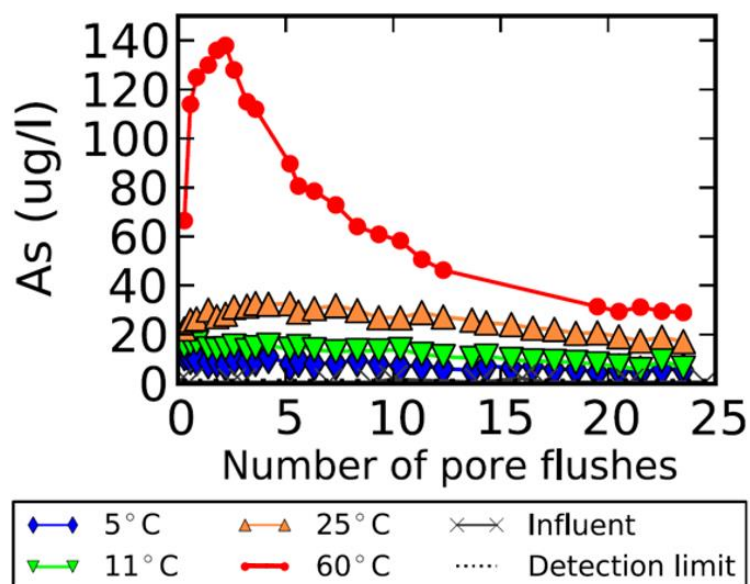
Lisäksi jäähdytysjärjestelmästä palautettavan veden lämpötilaan tulee kiinnittää huomiota. Monet bakteerit, homeet ja hiivat viihtyvät parhaiten yli +20 °C:n lämpötiloissa (Evira 2017). Arolan (2017) mukaan palautettavan veden lämpötilan tulisikin lämmitysjärjestelmässä olla alle 20 °C, jotta toiminta ei vaikuttaisi epäedullisesti ympäristön luonnolliseen tilaan ja elios-

töön. Lisäksi aerobiset bakteerit ja homeet tarvitsevat happea kasvaakseen, joten järjestelmän kierron pitäminen hapettomana voi heikentää mikrobien menestymistä (Evira 2017).

7.1 Tutkimustuloksia Hollannista

Hollannissa oli vuonna 2012 jo yli 2000 asennettua ATES-järjestelmää ja mielenkiinto pohjavesijärjestelmiin on jatkuvassa kasvussa. Järjestelmiä pyritään asentamaan yhä lähemmäs suojeltuja pohjavesialueita, joka on lisännyt tarvetta testeille ATES-järjestelmien vaikutuksesta pohjaveden kemialliseen ja mikrobiologiseen koostumukseen. Vuonna 2013 (Bonte, van Breukelen & Stuyfzand) Hollannissa suoritettiin testausta lämpötilan vaikutuksesta pohjaveden laatuun, jota varten kerättiin sekä vesi- että sedimenttinäytteitä Helvoirtin ja Scherpenzeelin alueelta. Sedimenttinäytteitä otettiin kolmesta eri pisteestä ja ne pidettiin koko käsittelyprosessin ajan hapettomissa olosuhteissa. Sedimenttinäytteet A ja B kerättiin Helvoirtista ja näyte C Scherpenzeelistä. Näytteen C alueella pohjavettä hyödynnetään sekä ATES-järjestelmässä, että juomavetenä. Samoja porausreikiä käytettiin pohjaveden monitorointiin ja vesinäytteidenottoon. Raportoitujen laboratoriokokeiden perusteella lämpötilan pysyessä alle 25 °C on vaikutukset luonnontilaiseen pohjaveteen verrattuna vähäisiä. Luonnontilaisen pohjaveden lämpötilaksi testatuilla alueilla oli määritetty 11 °C. Huomioitavaa on kuitenkin, että kohonneita arseenipitoisuuksia (As) havaittiin jo lämpötilassa 25 °C. Lämpötilassa 60 °C havaittiin huomattavasti kohonneita arvoja pH:n osalta sekä DOC- (liuennut orgaaninen hiili), P-, K-, Si-, As-, Mo-, V-, B- ja F-pitoisuuksia. Näitä arvoja tulisi raportin mukaan monitoroida, kun ATES-järjestelmä toimii alueella, jossa pohjavettä käytetään myös juomavetenä. Kyseisessä testissä arseenin pitoisuus ylitti juomavedelle asetetun raja-arvon 10 µg/l näytteissä B ja C lämpötilan ollessa 25 °C ja myös näyte A oli lähellä ohjearvoa. Arseenin raja-arvo ylittyi kaikissa näytteissä lämpötilan ollessa 60 °C. Na-, Ca-, Mg-, Sr-, Fe-, Mn-, Al-, Ba-, Co-, Cu-, Ni-, Pb-, Zn-, Eu-, Ho-, Sb-, Sc-, Yb-, Ga-, La- ja Th-pitoisuuksia oli luonnontilassa sedimentissä, mutta niiden pitoisuuksissa ei havaittu

lämpötilasta aiheutuvaa muutosta. Laskettaessa testilämpötilaa luonnontilaisen lämpötilan alapuolelle, 5 °C:seen, ei havaittu muutoksia pitoisuuksissa. Esimerkkinä kuviossa 24 on näytteen C testiarvot arseenille (As) eri lämpötilan arvoilla. (Bonte ym. 2013.)



KUVIO 24. Näytteen C arvot pohjaveden arseenipitoisuuksille eri testiolosuhteissa, lämpötilan arvolla 60 °C arvot puuttuvat väliltä 13-19 testivirheen vuoksi (Bonte ym. 2013)

Lähtötilanteessa mitattiin myös tiettyjen aineiden ja mineraalien taustapitoisuudet maaperänäytteistä. Tulokset on esitetty taulukossa 7 ja näitä tuloksia voidaan hyödyntää vertailtaessa mm. arseenin pitoisuuksia alueellisiin olosuhteisiin Lahdessa. Arseenin pitoisuus A-näytteessä oli 5,7 ppm, B-näytteessä 2,9 ppm ja C-näytteessä 3,7 ppm. Lukuarvot on ilmoitettu yksiköllä ppm (parts per million), joka vastaa Suomessa yleisesti taustapitoisuuksien kohdalla käytettävää lukuarvoa mg/kg. Tuloksista voidaan havaita, että pohjaveden arseenipitoisuus ja arseenin lisääntynyt pitoisuus pohjavedessä lämpötilan noustessa ei ole suoraan verrannollinen maaperän taustapitoisuuteen.

TAULUKKO 7. Maaperänäytteiden taustapitoisuuksia (Bonte ym. 2013)

Location			A: Helvoirt	B: Helvoirt	C: Scherpenzeel
Sampling depth (m-surface level)			44–46	32–34	34–36
Measured parameters	Method	Unit			
Reactive organic matter (LOI330)	Thermogravimetric analysis:	% d.w.	0.24	0.15	0.06
Bulk organic matter (LOI550) ^a	Loss on ignition (LOI) at 330,		0.76	0.48	0.14
Carbonate content (LOI1000)	550 and 1000°C		6.00	0.54	0.74
Clay content	Laser grain size analyses		3.76	2.21	1.34
Median grain size (d_{50})	(Fritch A22)	µm	187	244	310
S	Carbon Sulphur (CS)	% d.w.	0.1	0.03	0.05
	Combustion Analyzer (LECO)				
Minerals present	X-Ray diffraction (XRD,		Quartz, K-feldspar, albite, ferrian clinozoisite(C), muscovite (A&B), calcite, dolomite, ankerite (B)		
	Bruker D8 advance)				
Cr ₂ O ₃	X-ray fluorescence	%	0.037	0.028	0.001
Fe ₂ O ₃	(XRF, Panalytical - Axios)		1.36	1.02	0.59
Al ₂ O ₃			4.04	4.55	3.36
As	LiBO ₃ fusion followed by HNO ₃	ppm	5.7	2.9	3.7
Mo	digestion and inductively		0.2	5.8	0.1
V	coupled plasma – mass		18	17	<8
Be	spectrometry (ICP-MS, ELAN 9000)		2.00	<1	<1
Calculated parameters	Equation	Unit			
Bulk density, ρ_b	Weight/volume	g/cm ³	1.94	1.94	2.12
Porosity, n	$n = (\rho_{bulk} - \rho_{H_2O}) / (\rho_{solid} - \rho_{H_2O})$		0.43	0.43	0.32
Pyrite ^b	$0.5 \cdot S \cdot M_{FeS_2} / M_S$	% d.w.	0.19	0.06	0.09
Reactive iron (iron oxides) ^b	$2 \cdot M_{Fe} / M_{Fe_2O_3} \cdot (Fe_2O_3 - (0.225 \cdot Al_2O_3 - 0.91\%)) - 0.5 \cdot S \cdot M_{Fe} / M_S$		0.87	0.61	0.48

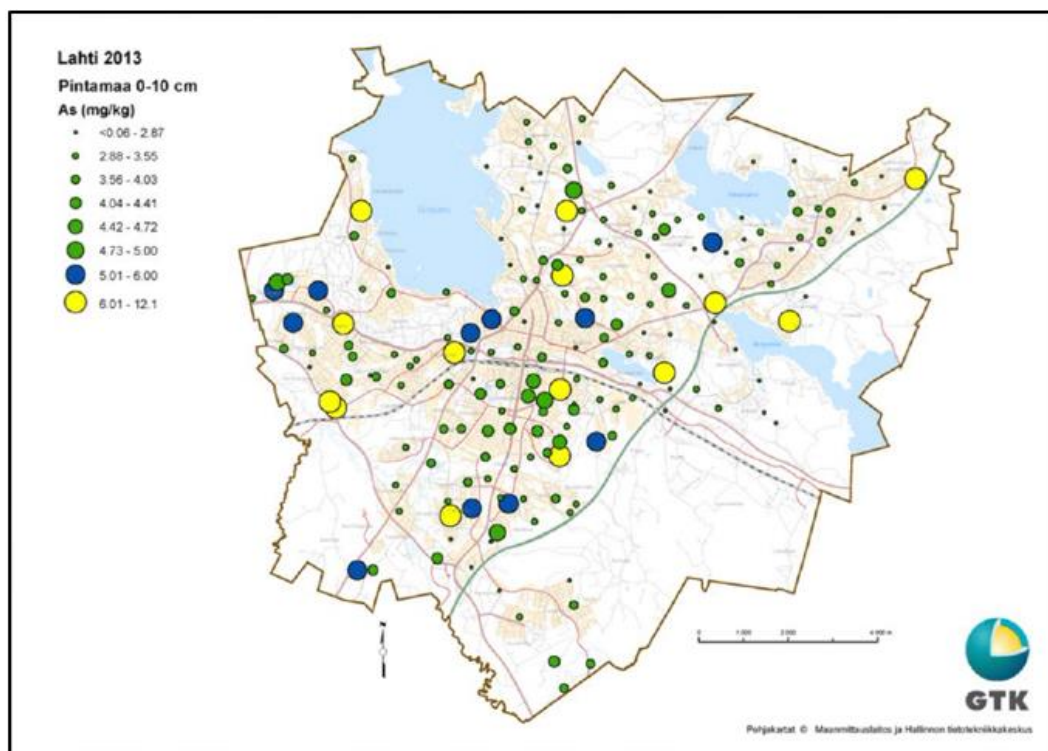
^aCorrected for structural water loss from clay according BOM = LOI550 – 0.7 × Clay% (Breeuwsma, 1987).

^b Based on Griffioen et al. (2012) with M_{FeS_2} , M_{Fe} , M_S , $M_{Fe_2O_3}$ being the molar masses of FeS₂, Fe, S, and Fe₂O₃, respectively (55.8, 32.1, 159.7), and Fe₂O₃ and Al₂O₃ the % d.w. of iron oxides and aluminium oxides in sediment determined by XRF, and S being the content of sulphur determined with the CS combustion analyser.

7.2 Arseenipitoisuudet Lahdessa

Pohjaveden lämpötilat olivat Lahden alueella vuonna 2012 tehdyissä mitauksissa 5,8-9,6 °C, riippuen mittauspisteen urbaanien toimintojen määrästä ja lukuun ottamatta maalämpöputkien läheisyydessä mitattuja arvoja, jotka olivat hieman korkeampia (Arola & Korkka-Niemi 2014). Pohjavesijärjestelmää käytettäessä jäähdytystarkoituksessa voi injektointikaivoon palautettavan pohjaveden lämpötila nousta verrattain korkeaksi, jos palautuslämpötilaa ei rajoiteta. Arolan (2017) mukaan järjestelmästä tulevan veden lämpötila tulisi olla korkeintaan 20 °C, jotta toiminta ei aiheuta muutoksia luonnontilaiseen pohjaveden laatuun. Kuten Bonte ym. toteavat vuoden 2013 raportissaan, havaittiin jo lämpötilassa 25 °C selvästi kohonneita arseenipitoisuuksia ja kahdessa kolmesta näytteestä juomaveden enimmäispitoisuus 10 µg/l ylittyi. Täten alhaisillakin palautettavan veden lämpötiloilla arseenipitoisuuksia tulisi mahdollisesti monitoroida suunniteltaessa pohjavesijärjestelmää. Kuviossa 25 on GTK:n tekemä karttoitus Lahden alueen arseenin taustapitoisuuksista vuodelta 2013. Näytteet on otettu

pintamaanäytteistä 0-10 cm syvyydeltä. (Hatakka, Tarvainen, Eklund, Luoma & Jarva 2014.)



KUVIO 25. GTK:n mittaamia arseenin taustapitoisuuksia Lahdessa vuonna 2013 (Hatakka ym. 2014)

Kun verrataan Lahden taustapitoisuuksia Hollannin testinäytteiden mit-taustuloksiin (Bonte M ym. 2013), on Lahdessa alueittain jopa suurempia taustapitoisuuksia. Toisaalta Hollannin testituloksista voidaan todeta, että pohjaveteen liuenneen arseenin määrä ei ole suoraan verrannollinen maa-perän taustapitoisuuteen. Esimerkiksi A-näytteessä oli suurin taustapitoi-suus (5,7 mg/kg), mutta juomaveden enimmäispitoisuus 10 µg/l ei kuiten-kaan ylittynyt. Vastaavasti B- ja C-näytteissä enimmäispitoisuus ylittyi eli toiminnan vaikutus arseenin liukenevuuteen on riippuvainen myös muista tekijöistä kuin pohjaveden palautuslämpötilasta ja alkuperäisestä maape-rän taustapitoisuudesta. Teppo Arolan (2017) mukaan pohjavesijärjestel-mien lämpötilavaikutukset vaihtelevat alueittain, riippuen geologisista olo-suhteista ja Hollannin mittaustulosten perusteella ei voida ennustaa ympä-ristövaikutuksia Suomen olosuhteissa.

Ympäristöasiat tulee aina huomioida jokaisessa kohteessa, jossa pohjavettä pumpataan ja imeytetään maaperään. Pohjaveden pumppauksen vaikutukset keskittyvät siihen mitä pumppauksesta johtuvan pohjaveden pinnan alentaminen tarkoittaa; kuivuuko naapurin kaivo, onko mahdollista, että pumppauksessa muutetaan haitallisesti pohjaveden virtaussuuntaa jne. Pohjavesienergiasysteemeissä pyritään usein siihen, että pohjavettä imeytettäisiin takaisin maaperään. Tällöin muutetaan väistämättä sen lämpötilaa (pelkästään pumppaamisessa ei vaikuteta akfiverin lämpötilaan). Lämpötilan muutosalue riippuu luonnollisista pohjavesiolosuhteista, imeytysmääristä ja -lämpötiloista.

Lämpötilavaikutukset riippuvat puolestaan hyvin pitkälti siitä, millaiset on geologiset olosuhteet, jonne imeytys tapahtuu. Meillä on erilaiset geologiset olosuhteet kuin Euroopassa ja se jo vaikuttaa lähtökohtaisesti myös ympäristövaikutuksiin. Siten esim. arseenin liukenevuuksia ja muita vaikutuksia ei voida suoraan kopioida eurooppalaisista olosuhteista meille. Näiden asioiden tutkimustulokset pohjoisissa ympäristöissä puuttuvat. Nyrkkisääntönä on pidetty, että lämpötilat 25-30 asteen nurkilla ovat vielä turvallisia – nyrkkisääntö perustuu osittain juuri Bonten ja Brielmannin artikkeleihin, mutta kunnon tutkimustuloksia ei ole käytettävissä. Lähtökohtaisesti meidän etu ympäristömielessä on Eurooppaan verrattuna kylmä pohjavesi, joka antaa mahdollisuuden suureen viilennyskapasiteettiin ja toisaalta tasaa imeytettävän veden lämpötilaa tehokkaasti. Jokaisessa pohjavesienergiasysteemissä tulee toteuttaa veden laadun tarkkailua. Tarkkailua varten tulee tehdä erillinen tarkkailusuunnitelma, joka hyväksytetään viranomaisilla. (Arola 2017.)

Valtioneuvoston asetuksessa maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista perusteella maaperän pilaantuneisuus ja puhdistustarve on arvioitava, jos yhden tai useamman haitallisen aineen pitoisuus maaperässä ylittää asetuksessa säädetyn kynnysarvon. Alueilla, joilla taustapitoisuus on kynnysarvoa korkeampi, arviointikynnyksenä pidetään taustapitoisuutta (Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007, 3§). Arseenilla kynnysarvoksi on asetettu 5mg/kg (SYKE 2017). Kuvion 25 perusteella Lahden alueella on havaittavissa alueellisesti kohonneita arseenipitoisuuksia ja kohteita joissa taustapitoisuudet ylittävät arseenille määritetyn kynnysarvon.

7.3 Radon pohjavedessä ja sisäilmassa

Lahden seudulla on luonnostaan kohonneita radonpitoisuuksia ja radon on tällä hetkellä merkittävimpiä säteilyaltistajia Suomessa, joten radioaktiivisten aineiden ympäristövaikutusten tarkastelun osalta työssä keskitytään radoniin (STUK 2017; Suomen radonhallinta 2017). Tämä on huomioitava joka tapauksessa myös rakentamisessa ja ilmanvaihdon suunnittelussa, joten on syytä arvioida, edistääkö pohjavesijärjestelmä radonin kulkeutusta rakennusten sisäilmaan, ja edellytetäänkö tällöin lisätoimenpiteitä, vai riittääkö olemassa oleva rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä radonin tuulettamiseksi pois sisäilmasta (VILPE® 2017).

”Pohjavedessä olevat luonnon radioaktiiviset aineet ovat peräisin maa- ja kallioperässä luonnostaan olevista radioaktiivista aineista, jotka liukenevat maankuoren mineraaleista veteen. Radionuklidipitoisuudet pohjavedessä ovat huomattavasti suurempia kuin pintaveden, koska pohjavesi on pidempään kosketuksissa maa- ja kallioperän kanssa. Talousveden kannalta merkittävimmät luonnon radioaktiiviset aineet kuuluvat uraanisarjaan. Alfasäteilyä lähettävä radon (Rn-222) on merkittävin säteilyaltistaja Suomessa. Muita tärkeitä uraanisarjan radionuklideja ovat pitkäikäiset U-238, U-234, Ra-226 ja Po-210 sekä beetasäteilyä lähettävä Pb-210. Luonnon toriumsarjan radionuklideista beetasäteilyä lähettävä Ra-228 on tärkein. Luonnon radioaktiivisuus vedessä voi lisääntyä myös ihmisen toiminnan seurauksena. Yleensä nämä lisäykset ovat hyvin vähäisiä.” (STUK 2015a.)

Eräänä riskinä on, että maalämpö-/pohjavesikaivo saattaa luoda radonille purkautumisreitit kohti maaperän pintakerroksia (Banks 2012, 457 - 458). Riski on suurin kallioperään poratuissa maalämpökaivoissa, mutta yleensä energiakaivot kuitenkin tehdään rakennuksen ulkopuolelle ja siten niissä ei huomioida radonia. Jos kaivoja tehdään parkki-, kellari- tai muihin sisätiloihin, tiloihin tehdään radontuuletus joka tapauksessa, koska rakennus sijaitsee radonalueella ja Arolan (2017) mukaan radonista ei tällöin synny ongelmaa. Pohjavesikaivojen suhteen tilanne on samankaltainen, mutta Suomessa lähes kaikki pohjavesikaivot ovat maaperäasennuksia ja siten radon ei ole niin merkittävässä roolissa maaperässä kuin kallioperässä (Arola 2017).

Kuten todettua, radonia esiintyy myös pohjaveteen liuenneena ja täten radonia kulkeutuu myös pohjaveden mukana pohjavettä pumpatessa. Radon haihtuu helposti ilmaan vettä lämmitettäessä ja täten edelleen siirtymisen hengitysteitse elimistöön mahdollistuu (STUK 2015). Pohjavesijärjestelmässä pohjavettä lämmitetään jäähdytyskaudella lämpöpumpun tai lämmönvaihtimen välityksellä, joten tilanteessa tulisi mahdollisesti huomioida radonkaasun purkautumisreitit järjestelmässä ja tarvittava ilmanvaihdon järjestäminen radonin poistamiseksi sisäilmasta. Suhteellinen radonpitoisuuden muutos sisäilmassa taustapitoisuuteen nähden ja olemassa olevan ilmanvaihdon mitoituksen riittävyys ovat järjestelmän kohdalla jäähdytyskauden osalta huomioitavia asioita. Jos kaasuuntumista tapahtuu putkistossa, myös paine kasvaa ja järjestelmässä tulisi olla varoventtiili paineen alentamiseksi. Tämä taas olisi eräs purkautumisreitti järjestelmään kerääntyvälle kaasulle. Taulukossa 8 on esitetty keskimääräisiä pitoisuuksia radioaktiivisille aineille Suomessa juoma-, pinta- ja pohjavedessä. Kuten taulukosta huomataan, verkostovedessä keskimääräinen radonpitoisuus on 27Bq/l ja vastaavasti maaperän pohjavedessä 50Bq/l (STUK 2015a). Vesilaitokset poistavat pohjavedestä radioaktiivisia aineita ennen veden toimittamista kuluttajille, joka vähentää radonille altistumista kotitalouksien käytettäessä vesijohtoverkon vettä. Radon on poistettava kaikesta talousvedestä, koska vedenkäytön yhteydessä ja varsinkin vettä lämmitettäessä se vapautuu sisäilmaan ja voi siten lisätä sisäilman radonpitoisuutta. Muille radioaktiivisille aineille riittää, kun ne poistetaan juomavedestä. Ne eivät vapaudu sisäilmaan kuten radon. (STUK 2015b.)

TAULUKKO 8. Keskimääräisiä pitoisuuksia radioaktiivisille aineille talousvedessä Suomessa (STUK 2015a)

Radioaktiivinen aine	Verkostovesi	Pintavesi	Rengaskaivot/ maaperän pohjavesi	Porakaivot
Luonnollinen radioaktiivisuus				
Radon-222 (Bq/l)	27	<3	50	460
Uraani-234 (Bq/l)	0,02	<0,01	0,02	0,35
Uraani-238 (Bq/l)	0,015	<0,01	0,015	0,26
Uraani-238 (µg/l)	0,23* 0,90**	<1	1,2 – 1,7	21 - 24
Radium-226 (Bq/l)	0,003	0,003	0,016	0,05
Radium-228 (Bq/l)	-	-	-	0,03
Polonium-210 (Bq/l)	0,003	-	0,007	0,048
Lyijy-210 (Bq/l)	0,003	-	0,013	0,040

Pohjaveden lämmöntalteenottojärjestelmässä pohjavesi kulkee omassa suljetussa kierrossa ja tämän vuoksi tilanne on erilainen kuin talousveden kohdalla ja laatuvaatimuksia ei voida suoraan verrata keskenään. Jos kuitenkin radonia tulee poistaa käytettävästä pohjavedestä, on se mahdollista suorittaa joko ilmastusmenetelmällä tai aktiivihiihtisuodatuksella. Oikein asennetulla ja suunnitellulla laitteella veden radonista saadaan poistettua yli 90 prosenttia. (STUK 2015b.) Lähtökohtaisesti pohjavesijärjestelmä tulisi pitää hapettomana, jotta putkien tukkeutumista aiheuttavaa hapettumis-pelkistysreaktioita ei tapahtuisi. Riskinä on esimerkiksi raudan saostuminen. Kierron pitäminen hapettomana voi lisäksi heikentää ei toivottujen

mikrobien menestymistä. Tämän vuoksi ilmastus ei ole ensisijainen ratkaisu pohjavesijärjestelmässä. Ilmastusmenetelmän etuna olisi, että se soveltuu kaikille radonpitoisuuksille, kun taas aktiivihiilisuodatus soveltuu ainoastaan alle 5000 Bq/l -pitoisuuksille. Aktiivihiilisuodatinta ei tule myöskään sijoittaa rakennukseen, jossa asutaan vakituisesti, koska suodatin alkaa säteillä, kun radon pidättyy siihen. Suositeltava paikka aktiivihiilisuodattimen asennukselle on erillinen tekninen rakennus tai kaivon yhteydessä oleva huoltokaivo. Vastaavasti ilmastuslaitteessa säteilylähdeongelmaa ei olisi ja se olisi mahdollista asentaa myös asuinrakennukseen.

(STUK 2015b.) Myös injektointikaivon sijainti tulee arvioida suhteessa asuinrakennuksiin ja rakennusten ilmanvaihtokanaviin. Kun jäähdytyskaudella kaivoon johdetaan lämmitettyä pohjavettä, on mahdollista, että kaivo toimii kaasuuntuneen radonin purkautumisreittinä. Tämä ei aiheuta ongelmaa, jos kaivosta vapautuva radon sekoittuu ulkoilmaan, eikä päädy ilmanvaihtokanaviin. Ulkoilmassa radon laimenee nopeasti, mutta sisäilmaan päästessään radon on haitallista ja lisää keuhkosityöpäriskiä. Rakentamiskäytännöissä ongelmia ilmenee etenkin talvisaikaan, kun sisäilma on lämpimämpää kuin ilma talon ulkopuolella. Tällöin lämpötilaero saa aikaan taloon alipaineen, joka imee sisäilmaan radonia muun ilman mukana.

(Uponor 2017.) Pohjavesikäyttöisessä lämmönsiirtojärjestelmässä lämmityskaudella pohjavedestä siirretään lämpöenergiaa rakennuksen sisäiseen järjestelmään eli pohjavesi palaa jäähtyneenä injektointikaivolle. Täten pohjaveden lämpenemisestä aiheutuvaa radonin haihtuvuuden lisääntymistä järjestelmässä ei tapahdu talvella, kun alipaineesta aiheutuva riski ilman kulkeutumiseen asuinrakennuksiin on suurimmillaan.

8 TULOKSET

8.1 Pohjaveden lämpötilavaihtelut ja energiasisältö

Ulkolämpötilan kausivaihtelu vaikuttaa pohjaveden lämpötilaan n. 10-15 metrin syvyyteen asti maanpinnasta, jonka jälkeen lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden (Arola 2017). Vuonna 2012 Lahdessa tehtyjen mittausten tuloksista voidaan havaita kohonneita pohjaveden lämpötiloja urbaaneilla ja kaupunkien keskusta-alueilla, kun verrataan lämpötiloja luonnontilaiseen mittauspisteeseen (Arola & Korkka-Niemi 2014). Tämän perusteella voidaan todeta, että pohjaveteen on varastoitunut huomattava määrä jo kertaalleen rakennuksista ympäristöön johtunutta lämpöenergiaa, joka olisi talteenotettavissa lämmöntalteenottojärjestelmien avulla.

Taulukosta 1 nähdään, että urbaaneilla alueilla mitattujen pohjaveden keskilämpötilojen keskiarvo kausivaihteluvyöhykkeen alapuolella on 8,0 °C. Lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen lämpöpumpulla pohjavedestä, jota voidaan jäähdyttää 1 °C:seen saakka ilman hyödynnettävän pohjaveden jäätymisriskiä (Arola 2017). Tällöin lämpötilaero $\Delta T = 8,0\text{ °C} - 1,0\text{ °C} = 7,0\text{ °C}$. Päivittäin Lahden seudulla pumpataan vesijohtovettä kotitalouksille 30 miljoonaa litraa eli 30 000 m³, joka vastaa keskimääräistä virtausmäärää 347 l/s (Lahden seudun luonto 2017). Tätä määrää käytetään tuloksissa esimerkkinä esitettäessä hyödynnettävää lämmitystehoa pohjaveden lämpötilan ollessa 8 °C. Todellisuudessa hyödynnettävän pohjaveden määrä tulee selvittää geologisten ja hydrologisten mallinnusten sekä pumppauskokeiden avulla (Arola 2017). Lämpöpumpun lämpökertoimena käytetään laskennassa arvoa $COP_H = 4$, joka on Arolan (2017) mukaan pohjavesijärjestelmien mitoituslaskennassa yleisesti käytössä.

Pohjavedestä pumpattavalle lämpömäärälle voidaan laskea teho G virtaaman Z (kg/s) avulla, joka on esitetty kaavassa 5 eli $G = Z \cdot c \cdot \Delta T$. Kun virtaama on 347 kg/s ja lämpötilan muutos 7,0 °C, saadaan teholle G arvo 10 177,5 kW. Kun asetetaan lämpökertoimelle arvo $COP_H = 4$, voidaan kokonaislämmitysteho H laskea kaavan 6 avulla. Tällöin $H = 10\,177,5\text{ kW} / (1 - \frac{1}{4}) = 13\,570\text{ kW} = 13,6\text{ MW}$.

8.2 Lämpöenergian kausivarastointi

Tietyissä olosuhteissa pohjavesivarastoa voidaan hyödyntää lämpöenergian kausivarastona, joka parantaa open-loop-järjestelmän hyötysuhdetta. Tällöin lämmityksessä hyödynnettävän pohjaveden lämpötilaa voidaan nostaa varastoimalla jäähdytyskaudella injektointikaivoon palautettavaa, lämminnyttä vettä ja vastaavasti jäähdytyksessä käytettävän veden lämpötilaa voidaan laskea varastoimalla lämmityskaudella viilentynyttä vettä (Banks 2012, 76 - 77). Lämmön kausivarastointi pohjaveteen edellyttää pohjaveden alhaista virtaamaa, jotta lämpö ei siirry pohjaveden mukana muualle ympäristöön (Sakai ym. 2017). Täten alueen geologiset ja hydrologiset olosuhteet asettavat rajoitteita tämän kaltaisille järjestelmille. Kun pohjavesivarastoa hyödynnetään lämpöenergian kausivarastona, käytetään järjestelmästä nimitystä ATES (Aquifer Thermal Energy Storage).

Esimerkkitapauksena on käytetty Arlandan lentokentän ATES-järjestelmää, jonka ansiosta lentokenttäalueen lämmitys- ja jäähdytys-tarve on ollut mahdollista kattaa passiivisen open-loop-järjestelmän avulla. Lämpöenergian kausivarastointi pohjaveteen on mahdollista luontaisen pohjavesimuodostuman ansiosta. Kallioperä jakaa pohjavesivarastot kahteen ”osastoon”, joista toista käytetään lämpimän veden varastointiin ja toista viileän veden varastointiin. (Banks 2012, 76 - 77.) Lämpimän osaston kaivossa pohjaveden lämpötila on n. 20 °C ja viileän osaston kaivossa n. 3-5 °C. Tämä mahdollistaa passiivisen lämmönsiirron eli lämmityskaudella lämpö siirretään pohjavedestä lentokentän sisäisen kierron lämmönsiirtonesteeseen suoraan levylämmönvaihtimien avulla, joista jäähtynyt pohjavesi johdetaan edelleen viileän puolen osastoon kausivarastoitavaksi jäähdytyskautta varten lämpötilassa 3-5 °C. Kierro on päinvastainen jäähdytyskaudella. Tällöin viilentynyttä pohjavettä johdetaan lämmönvaihtimiin, josta lämminnyt pohjavesi johdetaan edelleen lämpimän puolen osastoon kausivarastoitavaksi lämmityskautta varten lämpötilassa 20 °C.

Passiivisessa lämmönsiirtojärjestelmässä ainoastaan uppo- ja kiertovesipumput kuluttavat sähköenergiaa. Sähköenergian kulutus on vähäisempää kuin lämpöpumppujärjestelmässä, joka parantaa järjestelmän lämpö-

ja kylmäkerrointa. Arlandan ATES-järjestelmän koko lämmitys- ja jäähdytyskautta kuvaava lämpökerroin SPF (Seasonal Performance Factor) on noin 60 (Wigstrand 2009; Banks 2012, 76 - 77.)

8.3 Vertailu ilmalämpöpumppuihin

Ilmalämpöpumpun lämpökerroin eli COP_H -arvo on useilla valmistajilla parhaimmillaan lämpötilavälillä 5-7 °C. Nykyaikaisilla ilmalämpöpumpuilla voi lämpökerroin kyseisessä optimilämpötilassa olla hetkellisesti jopa yli 5, mutta lämpötilan laskiessa alle 0 °C ilmalämpöpumppujen lämpökerroin laskee merkittävästi. Tämä voidaan havaita myös kuviosta 15. (ScanOffice 2017.) Vastaavalla tavalla ilmalämpöpumpun kylmäkerroin laskee ulkolämpötilan noustessa jäähdytyskaudella. Open-loop-järjestelmän selkeänä etuna on, että lämmönlähteenä lämmityskaudella tai lämpönieluna jäähdytyskaudella toimivan pumppauskaivon pohjaveden lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden, joten aktiivijärjestelmässä lämpöpumpun lämpö- ja kylmäkerroin on lähes vakio vuodenajasta riippumatta (Banks 2012, 172 - 173).

Ero käyttökustannuksissa riippuu siis ulkolämpötilasta. Jos lämmityskaudella ulkolämpötila on lähellä 0 °C, säästö open-loop-järjestelmän käyttökustannuksissa jää vähäiseksi. Merkittävin etu ilmalämpöpumppuihin verrattuna saavutetaan lämmityskaudella alhaisissa ulkolämpötiloissa, koska pohjavesijärjestelmässä lämpökerroin pysyy lähes vakiona ulkolämpötilasta riippumatta. Esimerkiksi taulukon 3 mukaisesti WaterFurnace 7 Series 700A11 -mallien lämpökertoimet ovat mallista riippuen 5,1-5,3, joka vastaa kuvaajalta 14 luettavaa Bosch-ilmalämpöpumpun lämpökertoimen huippuarvoa. Vastaavasti kuviosta 15 nähdään, että ulkolämpötilan laskiessa -20 °C:seen, on Bosch-ilmalämpöpumppujärjestelmän lämpökerroin enää 2.

Jäähdytysjärjestelmässä hyötysuhteen ero ilmalämpöpumppuun nähden kasvaa suhteessa ulkolämpötilan nousuun. Lämpö siirtyy luontaisesti lämpimämmästä väliaineesta kylmemmän väliaineen suuntaan, joten lämmönsiirto on tehokkaampaa alle 10 °C:n lämpötilassa olevaan pohjaveteen

kuin yli 25 °C:n lämpötilassa olevaan ulkoilmaan. Pohjaveden alhaisen lämpötilan ansiosta voidaan jäähdytys toteuttaa open-loop-järjestelmässä myös passiivisesti suoraan lämmönvaihtimien avulla, jolloin jäähdytyksen kylmäkerroin (EER) kasvaa entisestään. Tällöin sähkönkulutus koostuu vain uppo- ja kiertovesipumppujen energiantarpeesta, joka on vähäisempää kuin lämpöpumpuilla. Open-loop-järjestelmä onkin parhaimmillaan jäähdytyskaudella ja ero kylmäkertoimessa on huomattavasti suurempi ilmalämpöpumppeihin nähden kuin lämpökertoimessa. Taulukoista 2 ja 3 nähdään, että WaterFurnace Series 700A11 open-loop-järjestelmän kylmäkerroin on 37,2-42,5, kun taas Panasonic Nordic CE 9 ja 12 -ilmalämpöpumpuissa jäähdytyskauden kylmäkerroin SEER on 7,11-7,25. Ilmalämpöpumpuille ilmoitetaan usein koko jäähdytyskauden kylmäkerrointa kuvaava arvo SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio).

Valmistajien ilmoittamat lämpö- ja kylmäkertoimet riippuvat lopulta täysin käytetystä testaustandardista ja tämän vuoksi tarkka arvioi syntyvistä säästöistä käyttökustannuksissa järjestelmien välillä on hankalaa. Esimerkiksi ilmalämpöpumpuilla koko lämmityskauden lämpökerrointa kuvaavan SCOP-arvon määrittämisessä käytettävät ulkolämpötilat ja käyttötunnit on määritetty standardissa SFS-EN 14825. Lisäksi testiolosuhteet on jaettu kolmeen ilmastovyöhykkeeseen: Helsinki (Colder), Strasbourg (Average) ja Ateena (Warmer). Täten saavutettu lämpökerroin riippuu käytetystä ilmastovyöhykkeestä. Esimerkiksi Helsingin vyöhykkeellä suurimmat testauksen käyttötunnit (>200 h) on välillä -4 °C...+10 °C ja eniten käyttötunteja lämpötilassa 1 °C (533 h). (SFS-EN 14825:2016, 56-57.) Kylmempien jaksojen pidentyessä voi määritetty SCOP-arvo pienentyä ja ero verrattavaan open-loop-järjestelmään kasvaa. Vastaavasti ulkolämpötilan ollessa oletettua korkeampi lämmityskauden aikana, on muutos päinvastainen.

8.4 Vertailu maalämpöpumppeihin

Kuten ilmalämpöpumppujenkin kohdalla, erot lämpö- ja kylmäkertoimissa open-loop- ja closed-loop-järjestelmien välillä syntyvät lämmityskaudella lämmönlähteen tai vastaavasti jäähdytyskaudella lämpönielun lämpötilasta

eli lämpötilaerosta $\Delta T = T_{\text{sisä}} - T_{\text{lähde}}$ sekä lämmönsiirron tehokkuudesta ulkoisesta järjestelmästä sisäiseen järjestelmään. Pohjaveden lämpötila on lämmityskauden aikana usein hieman korkeampi kuin maalämpökaivon tai vaaka-asennuksessa maaperän pintakerrosten lämpötila ja lisäksi lämmönsiirto ulkoisesta järjestelmästä sisäiseen järjestelmään on tehokkaampaa avoimessa kierrossa. Suljetussa kierrossa lämpö siirtyy ensin maaperästä lämmönkeruuputkistossa kiertävään lämmönsiirtonesteeseen, joka vapauttaa vastaanottamansa lämpöenergian edelleen lämpöpumpun sisäiseen kiertoon. Ylimääräiset lämmönsiirtovaiheet laskevat lämmönsiirron tehokkuutta ja lisäksi maalämpöjärjestelmä palautuu hitaammin lämmityskauden kuormituksesta. Koska lämmönlähteen lämpötila on korkeampi open-loop-järjestelmässä lämmityskaudella ja lämmönsiirto on tehokkaampaa, myös lämpökerroin on korkeampi. Sama voidaan todeta alaluvun 6.2 taulukossa 3 esitettyjen WaterFurnace 7 -sarjan lämpöpumppujen lämpökertoimista open-loop- ja closed-loop-järjestelmissä.

Kun lämpökaivosta siirtyy lämmityskaudella lämpöenergiaa enemmän pois kuin tulee tilalle, muuttuu kaivon energiatase negatiiviseksi ja se alkaa jäähtyä, joka laskee COP_H -arvoa lämpötilaeron kasvaessa sisäisen ja ulkoisen järjestelmän välillä. Pahimmassa tapauksessa maalämpökaivo voi jopa jäätyä liian nopean jäähtymisen johdosta. Open-loop-järjestelmässä pohjavettä virtaa pumppauskaivoon samassa suhteessa pumpattavan vesimäärän kanssa, kun kaivon antoisuus on riittävä. Kun pohjaveden lämpötila on vakio, myös saapuvan lämpöenergian määrä kaivoon on sama kuin kaivosta poistuvan lämpöenergian määrä ja energiatase ei muutu eli $Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = 0$. Tällöin lämmönlähteenä toimiva pumppauskaivo ei jäähdy ja lämpökerroin COP_H pysyy lähes vakiona. Kuten luvun 5.2 taulukosta 3 voidaan havaita, on esimerkiksi WaterFurnace 7-sarjan lämpöpumpuilla lämpökerroin hieman suurempi open-loop-järjestelmässä.

Myös maalämpöpumppujen testitulokset vaihtelevat valmistajasta ja testiolosuhteista riippuen, eivätkä standardien mukaan suoritettujen testitkään ole aina yksikäsitteisiä. Suomessa yleisesti käytettävässä standardissa SFS-EN 14511-2 on määritetty testiolosuhteet eri lämpöpumpun lämmönläh-

teille, josta käy ilmi lämmönlähteen lämpötila ja lämmösiirtonesteen palautuslämpötila (SFS-EN 14511-2:2013, 10-11). Lisäksi standardissa SFS-EN 14825 on määritetty testinaikaiset ulkolämpötilat (SFS-EN 14825:2016, 26-28). Standardista SFS-EN 14825 tai valmistajien julkaisemista testituksista ei kuitenkaan käy ilmi, miten ulkolämpötilan odotetaan vaikuttavan lämmönlähteen eli lämpökaivon, lämmönkeruuputkiston tai pohjaveden lämpötilaan. Myöskään maaperävaatimuksia ei standardissa ole määritetty. (SFS-EN 14825:2016.) Tämä jättää mahdollisuuden eriäville testituksille, joten tarkkaa arviota syntyvistä säästöistä käyttökustannuksissa open-loop- ja closed-loop-järjestelmien välillä ei voi suorittaa valmistajien ilmoittamien suorituskertoimien perusteella.

8.5 Open-loop-järjestelmän suunnittelu ja mitoitus

Ensimmäisenä maaperän rakenne tulee selvittää, jotta voidaan tehdä simulaatio pohjaveden kulkeutumisesta ja virtaussuunnista sekä pintaveden kulkeutumisesta pohjaveteen. Kun virtaussuunta ja pohjaveden lämpötilatasot tiedetään, voidaan suunnitella kaivojen paikat tehokkaasti. Pumpauskaivot asetetaan pohjaveden tulosuuntaan ja injektointikaivot riittävän kauas pohjaveden virtaussuuntaan. Tällöin viilentynyt pohjavesi ei pääse sekoittumaan haitallisessa määrin ylävirran pumppauskaivon normaalilämpöisen pohjaveden kanssa, vaan virtaa virtaussuunnan mukaisesti kaivoista pois päin. (Arola 2017.) Kaavassa 7 ja kuviossa 20 on esitetty periaatteet kaivojen vähimmäisetäisyyden määrittämiseen. Etäisyydelle on määritetty arvo $L > \frac{2Z}{T\pi i}$ (Banks 2012, 227 - 230).

Tämän jälkeen selvitetään lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve mahdollisimman tarkasti, mieluiten päivä- tai jopa tuntitasolla. Kun kaivojen paikat on määritetty ja kulutustasot tiedetään, voidaan arvioida vuosi-, kuukausi-, päivä-, ja tuntikohtainen pumppaustaajuus (virtaama, l/s) energiantarpeen kattamiseksi alaluvussa 4.3 esitettyjen kaavojen 5 ja 6 avulla. Näiden tietojen pohjalta mitoitetaan pumppauskoe pohjaveden antoisuuden määrittämiseksi ja selvitetään pohjaveden luontainen kyky palautua pumppauksen

aiheuttamasta veden poistumasta. Toiminnan hydrologisia vaikutuksia ympäröivään pohjavesivarastoon voidaan tarkkailla seurantakaivojen avulla (Arola 2017).

Geoenergiajärjestelmää ei ole kannattavinta mitoittaa lämpöenergian huippukulutuksen mukaan. Järjestelmä on yleensä kustannustehokkainta mitoittaa peruskuormalle, joka on normaalisti noin 50-60 % maksimitehosta (Arola 2017.) Esimerkiksi kuviosta 21 nähdään, että esimerkkikohteen kokonaislämpöenergian tarpeesta katetaan n. 96%, kun järjestelmän mitoitus on 60% maksimitehontarpeesta. Taulukossa 6 on esitetty keskimääräinen pumppaustaajuus eli pohjaveden keskivirtaama (l/s) suurimman päiväkulutuksen hetkellä, kun järjestelmän mitoitus on 60% maksimitehosta. Päiväkulutuksen arvolla 3118 kWh on tällöin keskiteho 99,4 kW ja keskivirtaama 2,5 l/s.

8.6 Vertailevat testitulokset (Mitsubishi)

Mitsubishin testituloksia verrattiin WaterFurnace 7 series -lämpöpumppujen open-loop-järjestelmän lämpökertoimiin. WaterFurnace 7 series -lämpöpumppujen lämpökertoimien määrittämisessä on noudatettu standardia ISO 13256-2 (WaterFurnace 2017). Standardissa ISO 13256-2 on määritetty lämpökertoimen määrittämisessä lämpöpumpulle saapuvan pohjaveden lämpötilaksi 10 °C ja vesikiertoisen järjestelmän lämpötilaksi 40 °C (ISO 13256-2:1998, 5). Toisin kuin standardissa SFS-EN 14511-2, standardissa ISO 13256-2 ei ole määritetty rakennuksen sisäisen järjestelmän paluuv veden lämpötilaa eli sisäisen lämmityskierron ΔT :n arvo riippuu valmistajan määrittämästä pumppaustaajuudesta (l/s) (ISO 13256-2:1998, 5; SFS-EN 14511-2:2013, 10-11). Mitsubishin testissä lämpöpumpulle saapuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila oli 10 °C ja paluulämpötila 5 °C. Rakennukseen saapuvan veden lämpötila oli 43 °C ja palaavan veden 38 °C (Sakai ym. 2017). Lämpöpumpulle saapuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila on sama kuin standardeissa ISO 13256-2 ja SFS-EN 14511-2 määritetty lämpöpumpulle saapuvan pohjaveden lämpötila. Lisäksi rakennuksen sisäisen

kierron lämpötila on lähellä molempia standardeja, joten olosuhteita voidaan pitää vertailukelpoisina.

Kuvion 19 kuvaajasta nähdään, että lämmitystehoa nostettaessa yli 80%:iin kokonaiskapasiteetista (850 kW) nousee myös lämpöpumpun lämpökerroin ja korkein mitattu arvo oli $COP_H = 5,3$. Lämpöpumpun COP_H arvo 80 %:n käyttöteholla on vastaava kuin WaterFurnace 7 series -lämpöpumpuille taulukossa 3 ilmoitetut arvot.

8.7 Ympäristövaikutukset

Open-loop-järjestelmän ympäristövaikutukset keskittyvät pohjaveden lämpötilan muutokseen. Koska Suomessa ei tutkimustuloksia vielä ole, käytettiin ympäristövaikutusten kartoituksessa pohjana Hollannissa tehtyjä tutkimuksia.

8.7.1 Arseeni

Hollannissa tehdyissä tutkimuksissa havaittiin kohonneita arseenipitoisuuksia (As) jo lämpötilassa 25 °C. Lämpötilan pysyessä alle 25 °C oli vaikutukset luonnontilaiseen pohjaveteen verrattuna vähäisiä. Lämpötilassa 60 °C havaittiin huomattavasti kohonneita arvoja pH:n osalta sekä DOC- (liennut orgaaninen hiili), P-, K-, Si-, As-, Mo-, V-, B- ja F-pitoisuuksia. Näitä arvoja tulisi raportin mukaan monitoroida, kun ATES-järjestelmä toimii alueella, jossa pohjavettä käytetään myös juomavetenä. Kyseisessä testissä arseenin pitoisuus ylitti juomavedelle asetetun raja-arvon 10 µg/l näytteissä B ja C lämpötilan ollessa 25 °C ja myös näyte A oli lähellä ohjearvoa. Arseenin raja-arvo ylittyi kaikissa näytteissä lämpötilan ollessa 60 °C. Na-, Ca-, Mg-, Sr-, Fe-, Mn-, Al-, Ba-, Co-, Cu-, Ni-, Pb-, Zn-, Eu-, Ho-, Sb-, Sc-, Yb-, Ga-, La-, ja Th-pitoisuuksia oli luonnontilassa sedimentissä, mutta niiden pitoisuuksissa ei havaittu lämpötilasta aiheutuvaa muutosta. Laskettaessa testilämpötilaa luonnontilaisen lämpötilan alapuolelle, 5 °C:seen, ei havaittu muutoksia pitoisuuksissa.

Lähtötilanteessa mitattiin myös tiettyjen aineiden ja mineraalien taustapitoisuudet maaperänäytteistä. Tulokset on esitetty taulukossa 7 ja näitä tuloksia voidaan hyödyntää vertailtaessa mm. arseenin pitoisuuksia alueellisiin olosuhteisiin Lahdessa. Arseenin pitoisuus A-näytteessä oli 5,7 ppm, B-näytteessä 2,9 ppm ja C-näytteessä 3,7 ppm. Lukuarvot on ilmoitettu yksiköllä ppm (parts per million), joka vastaa Suomessa yleisesti taustapitoisuuksien kohdalla käytettävää lukuarvoa mg/kg. Tuloksista voidaan havaita, että pohjaveden arseenipitoisuus ja arseenin lisääntynyt pitoisuus pohjavedessä lämpötilan noustessa ei ole suoraan verrannollinen maaperän taustapitoisuuteen.

Kun verrataan Lahden taustapitoisuuksia Hollannin testinäytteiden mitaustuloksiin, on Lahdessa alueittain jopa suurempia taustapitoisuuksia. Toisaalta Hollannin testituloksista voidaan todeta, että pohjaveteen liuenneen arseenin määrä ei ole suoraan verrannollinen maaperän taustapitoisuuteen. Lisäksi Teppo Arolan (2017) mukaan open-loop-järjestelmien lämpötilavaikutukset vaihtelevat alueittain, riippuen geologisista olosuhteista ja Hollannin mittaustulosten perusteella ei voida ennustaa ympäristövaikutuksia Suomen olosuhteissa. Näiden asioiden tutkimustulokset pohjoisissa ympäristöissä puuttuvat ja se onkin yksi alue, johon Arola (2017) aikoo keskittyä tulevana vuosina.

Lähtökohtaisesti Suomen etuna ympäristömielessä on Eurooppaan verrattuna kylmä pohjavesi, joka antaa mahdollisuuden suureen viilennyskapasiteettiin ja toisaalta tasaa imeytettävän veden lämpötilaa tehokkaasti. Jokaisessa open-loop-järjestelmässä tulee toteuttaa veden laadun tarkkailua. Tarkkailua varten tulee tehdä erillinen tarkkailusuunnitelma, joka hyväksytään viranomaisilla. (Arola 2017.)

8.7.2 Radon

Radon on merkittävimpiä säteilyaltistajia Suomessa ja Lahdessa on alueellisesti kohonneita sisäilman radonpitoisuuksia (STUK 2017; Suomen radonhallinta 2017). Radon on huomioitava joka tapauksessa myös rakentamisessa ja ilmanvaihdon suunnittelussa, joten on syytä arvioida, edistääkö

pohjavesijärjestelmä radonin kulkeutumista rakennusten sisäilmaan, ja edellytetäänkö tällöin lisätoimenpiteitä, vai riittääkö olemassa oleva rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä radonin tuulettamiseksi pois sisäilmasta (VILPE® 2017).

Eräänä riskinä on, että maalämpö- tai pohjavesikaivo saattaa luoda radonille purkautumisreitit kohti maaperän pintakerroksia (Banks 2012). Riski on suurin kallioperään poratuissa maalämpökaivoissa, mutta yleensä energiakaivot kuitenkin tehdään rakennuksen ulkopuolelle ja siten niissä ei huomioida radonia. Jos kaivoja tehdään parkki-, kellari- tai muihin sisätiloihin, tiloihin tehdään radontuuletus joka tapauksessa, koska rakennus sijaitsee radonalueella ja Arolan (2017) mukaan radonista ei tällöin synny ongelmaa. Pohjavesikaivojen suhteen tilanne on samankaltainen, mutta Suomessa lähes kaikki pohjavesikaivot ovat maaperäasennuksia ja siten radon ei ole niin merkittävässä roolissa maaperässä kuin kallioperässä (Arola 2017).

Radonia esiintyy myös pohjaveteen liuenneena ja täten radonia kulkeutuu pohjaveden mukana pohjavettä pumpatessa. Radon haihtuu helposti ilmaan vettä lämmitettäessä ja täten edelleen siirtyminen hengitysteitse elimistöön mahdollistuu (STUK 2015). Open-loop-järjestelmässä pohjavettä lämmitetään jäähdytyskaudella lämpöpumpun tai lämmönvaihtimen välityksellä, joten tilanteessa tulisi mahdollisesti huomioida radonkaasun purkautumisreitit järjestelmässä ja tarvittava ilmanvaihdon järjestäminen radonin poistamiseksi sisäilmasta. Jos kaasuuntumista tapahtuu putkistossa, myös paine kasvaa ja järjestelmässä tulisi olla varoventtiili paineen alentamiseksi. Tämä taas olisi eräs purkautumisreitti järjestelmään kerääntyvälle kaasulle.

On myös mahdollista, että vuotoja ei tapahdu itse järjestelmässä ja injektointikaivo toimii ainoana radonkaasun purkautumisreittinä jäähdytyskaudella, kun kaivoon johdetaan lämmitettyä pohjavettä. Täten injektointikaivon sijainti tulee arvioida suhteessa asuinrakennuksiin ja rakennusten ilmanvaihtokanaviin. Rakentamiskäytännöissä ongelmia ilmenee etenkin talvisaikaan, kun sisäilma on lämpimämpää kuin ilma talon ulkopuolella.

Lämpötilaeron aikaan saama alipaine lisää riskiä radonin kulkeutumiselle sisäilmaan ulkoilman mukana. (Uponor 2017.) Open-loop-järjestelmän etuna tässä tapauksessa on, että lämmityskaudella pohjavesi palaa jäähtyneenä injektointikaivolle. Täten pohjaveden lämpenemisestä aiheutuvaa radonin haihtuvuuden lisääntymistä järjestelmässä ei tapahdu talvella, kun alipaineesta aiheutuva riski ilman kulkeutumiseen asuinrakennuksiin on suurimmillaan.

Jos radonia tulee poistaa käytettävästä pohjavedestä, on se mahdollista suorittaa joko ilmastusmenetelmällä tai aktiivihiilisuodatuksella. Oikein asennetulla ja suunnitellulla laitteella veden radonista saadaan poistettua yli 90 prosenttia. (STUK 2015b.) Ilmastus ei tässä tapauksessa ole ensisijainen ratkaisu, koska open-loop-järjestelmän kierto tulisi pitää hapettomana. Aktiivihiilisuodatus taas asettaa tiettyjä rajoitteita toiminnalle, sillä se soveltuu ainoastaan alle 5000 Bq/l -pitoisuuksille. Lisäksi aktiivihiilisuodatin alkaa säteillä, kun radon pidättäytyy siihen. Tämän vuoksi aktiivihiilisuodatinta ei tule sijoittaa asuinrakennuksiin, vaan erilliseen tekniseen rakennukseen tai kaivon yhteydessä olevaan huoltokaivoon. (STUK 2015b.)

9 YHTEENVETO

Pohjaveden hyödyntäminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä on vielä vähäistä Suomessa, mutta muualla Euroopassa ja Yhdysvalloissa on järjestelmien määrä jatkuvassa kasvussa. Open-loop-järjestelmässä lämmönlähteenä lämmityskaudella ja lämpönieluna jäähdytyskaudella toimiva pohjavesi on lähes vakiolämpöistä ympäri vuoden, joten järjestelmään liitetyn lämpöpumpun lämpö- ja jäähdytyskerroin pysyy lähes vakiona. Vuodenaikakohtaisen ilman lämpötilavaihtelun vaikutus ulottuu 10-15 metrin syvyyteen asti ja järjestelmässä hyödynnetään pohjavettä, joka on tämän kausivaihteluvyöhykkeen alapuolella. Lahden seudulla mitattiin vuonna 2012 luonnontilaisilla alueilla pohjaveden keskilämpötilaksi vastaavalta syvyysalueelta 5,8 °C. Urbaaneilla eli teollisuuden ja rakentamisen vaikutuksen alaisilla alueilla mitattiin 2-3 °C korkeampia lämpötiloja, keskiarvoltaan 8 °C. Merkittävin etu lämmityskaudella saavutetaan alhaisissa lämpötiloissa, koska pohjavesijärjestelmässä lämmitysteho pysyy vakiona ulkolämpötilasta riippumatta, kun taas esimerkiksi ilmalämpöpumpuilla lämpökerroin laskee huomattavasti lämpötilan laskiessa alle 0 °C. Vastaavasti jäähdytysjärjestelmässä hyötysuhteen ero ilmalämpöpumppuun nähden kasvaa suhteessa ulkolämpötilan nousuun, koska lämpö siirtyy luontaisesti lämpimämmästä väliaineesta kylmempään väliaineeseen. Lämmönsiirto on selvästi tehokkaampaa alle 10-celsiusasteiseen pohjaveteen kuin yli 20-celsiusasteiseen ulkoilmaan. Pohjaveden alhaisen lämpötilan ansiosta voidaan jäähdytys toteuttaa myös passiivisesti suoraan lämmönvaihtimien avulla, jolloin jäähdytyksen kylmäkerroin kasvaa entisestään. Tällöin sähkönkulutus koostuu vain uppo- ja kiertovesipumppujen energiantarpeesta, joka on vähäisempää kuin lämpöpumpuilla.

Pohjavesi kulkee omassa ulkoisessa järjestelmässään, eikä tämän vuoksi joudu kosketuksiin sisäisen järjestelmän lämmönsiirtonesteen kanssa missään kierron vaiheessa. Ainoa vaikutus pohjaveteen syntyy lämpötilan muutoksesta, joka tulee ottaa huomioon ympäristövaikutusten arvioinnissa. Matalissa pohjaveden palautuslämpötiloissa (alle 25 °C) ei ole havaittu merkittäviä kemiallisia tai mikrobiologisia vaikutuksia, lukuun ottamatta arseenin pitoisuuksien kasvua ja liikkuvuuden lisääntymistä jo 25

°C:n lämpötilassa. Tutkimustulokset lämpötilan vaikutuksista perustuvat Hollannissa tehtyihin kokeisiin ja etumme Suomessa on ympäristömiellessä Eurooppaan verrattuna kylmä pohjavesi, joka antaa mahdollisuuden suureen viilennyskapasiteettiin ja toisaalta tasaa imeytettävän veden lämpötilaa tehokkaasti. Jokaisessa pohjavesienergiasyteemissä tulee toteuttaa veden laadun tarkkailua. Tarkkailua varten tulee tehdä erillinen tarkkailusuunnitelma, joka hyväksytetään viranomaisilla.

Koska Lahden seudulla on luonnostaan kohonneita radonpitoisuuksia, myös radonia tarkasteltiin osana järjestelmän ympäristövaikutuksia. Pohjaveden lämpötilan nousu voi lisätä pohjaveteen sitoutuneen radonin kaasuuntumista. Lämmitettyä pohjavettä johdetaan injektointikaivolle jäähdytyskaudella, jolloin kaivo saattaa toimia radonkaasun purkautumisreittinä. Täten injektointikaivon sijainti tulee arvioida rakennukseen ja ilmanvaihtojärjestelmiin nähden. Vastaavaa riskiä ei ole lämmityskaudella, jolloin pohjavesi palaa jäähtyneenä järjestelmästä injektointikaivolle.

LÄHTEET

Andersson, O. 2009. The ATES Project at Stockholm Arlanda Airport - Technical Design and Environmental Assessment [viitattu 11.12.2017].

Saatavissa: http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/56.pdf

AlfaLaval 2017a. Alfa Laval T20 tuotetiedot [viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/industrial/t20_pdleaflet_pct00042en.pdf

AlfaLaval 2017b. Alfa Laval TL35 tuotetiedot [viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/industrial/alfa-laval-tl35_en.pdf

Arola, T. 2012. Pohjavesi energiavarastona Suomessa. Golder Associates.

Arola, T. 2017. Geoenergian johtava asiantuntija. Geologian tutkimuskeskus. Haastattelututkimus 5.6.2017-12.12.2017.

Arola, T. & Korkka-Niemi, K. 2014. The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. Hydrogeology Journal.

Banks, D. 2012. Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling (2nd Edition). John Wiley & Sons, Incorporated.

Bonte, M., van Breukelen, B.M. & Stuyfzand, P.J. 2013. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking and shallow geothermal energy production. Water Research.

Energy Star 2007. Most Efficient 2017 - Geothermal Heat Pumps [viitattu 7.8.2017]. Saatavissa: https://www.energystar.gov/index.cfm?c=most_efficient.me_geothermal_heat_pumps

Evira 2017. Yleistä mikrobeista [viitattu 3.8.2017]. Saatavissa: <https://www.evira.fi/elintarvikkeet/tietoa-elintarvikkeista/elintarvikevaarat/ruokamyrkytykset/yleista-mikrobeista/>

Hatakka, T., Tarvainen, T., Eklund, M., Luoma, S. & Jarva, J. 2014. Lahden taajama-alueiden maaperän taustapitoisuudet. Geologian tutkimuskeskus.

Hautala, M. & Peltonen, H. 2014. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa 1. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.

Ilmalämpöpumppu.fi 2017. Ilmalämpöpumput [viitattu 8.8.2017]. Saatavissa: <http://www.ilmalampopumppu.fi/ilmalampopumput/>

ISO 13256-2, 1998. Water-source heat pumps - Testing and rating for performance - Part 2: Water-to-water and brine-to-water heat pumps. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Kurnitski, J. 2007. Kesäaikaisten lämpötilojen hallinta asuinkerrostaloissa [viitattu 9.8.2017]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK080304.pdf>

Lahden ammattikorkeakoulu 2017. Nastolan Energiaekosysteemi ja Teolliset Symbioosit [viitattu 4.12.2017]. Saatavissa: <http://www.lamk.fi/projektit/nets/Sivut/default.aspx>

Lahden seudun luonto 2007. Pohjavesi. [viitattu 9.8.2017]. Saatavissa: <http://www.lahdenseudunluonto.fi/lahden-seudun-luonto/vesistot/pohjavesi>

MAOL. 2006. Maol taulukot. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

Nilan 2017. Maalämpöpumpun vuosihyötysuhde [viitattu 11.8.2017]. Saatavissa: <http://www.nilan.fi/poistoilmalampopumput/uudisrakentajille/maalampopumpun-vuosihyotysuhde/>

Oilon 2017. Oilon GT 16: Tuoteseloste [viitattu 29.8.2017]. Saatavissa: https://filebrowser.oilon.com/www/uploadedfiles/OilonHome/Materials/EU_811-2013_tuoteseloste_EU%20813-2013_tuotetiedot_GT_16-28_2015-10-01.pdf

Saarikko, M. 2017. Uusiutuva energia tarvitsee innovaatioita - Pohjavesienergian hyödyntäminen aluillaan. Geofoorumi 1/2017. [viitattu 11.12.2017]. Saatavissa: <http://verkkolehti.geofoorumi.fi/fi/2017/03/30/uusiutuva-energia-tarvitsee-innovaatioita/>

Sakai, M., Cui, L., Fuchimoto, T., Tsuji, K., Ueda, K. 2017. Centrifugal Chiller System Using ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) of Renewable Energy. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 54 No. 2

ScanOffice 2017. Ilmalämpöpumppujen testiraportti [viitattu 9.8.2017]. Saatavissa: <https://www.scanoffice.fi/fi/tuotteet/tuoteryhmat/ilmalampopumput/raportit-ja-sertifikaatit/vttn-testiraportit>

SFS-EN 14511-2, 2013. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Part 2: Test conditions. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

SFS-EN 14825, 2016. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Slussen 2008. An enormous thermos heats Arlanda [viitattu 9.8.2017]. Saatavissa: <http://www.slussen.eu/Default.aspx?newNewID=15119&admSiteID=5&parMenMPalD=760>

STUK 2015a. Juomavesi [viitattu 12.9.2017]. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/elintarvikkeet-ja-juomavesi/juomavesi>

STUK 2015b. Radioaktiivisten aineiden poistaminen juomavedestä [viitattu 12.9.2017]. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/elintarvikkeet-ja-juomavesi/juomavesi/radioaktiivisten-aineiden-poistaminen-juomavedesta>

STUK 2017. Pientaloasuntojen radonpitoisuudet Suomen kunnissa [viitattu 23.11.2017]. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/radon/radon-suomessa/pientaloasuntojen-radonpitoisuudet-suomen-kunnissa>

Suomen radonhallinta 2017. Radonalueet Suomessa, STUK [viitattu 22.11.2017]. Saatavissa: <http://www.suomenradonhallinta.fi/radon-info/radon-alueet>

Swegon 2017. CASA kanavapatteri maalämpöpumpun yhteyteen [viitattu 15.8.2017]. Saatavissa: http://www.swegonhomesolutions.dk/Global/PDFs/Home%20ventilation/Accessories/fi/SDHWM_FI-p.pdf

Uponor 2017. Perustusratkaisut.

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007, 3§.

VILPE® 2017. Keuhkosityöpää aiheuttava radon voidaan poistaa sisäilmästä rakennustekniikan avulla. [viitattu 22.11.2017]. Saatavissa: <http://www.vilpe.com/fi/aineistopankki/mediatiedotteet/media1.html>

WaterFurnace 2017. 7 SERIES 700A11 SPECIFICATION CATALOG [viitattu 20.11.2017] Saatavissa: <https://www.waterfurnace.com/literature/7series/BR2700AN.pdf>

Wigstrand, I (2009). The ATES project – a sustainable solution for Stockholm-Arlanda airport. Saatavissa: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/55.pdf

LIITTEET

LIITE 1. Haastattelukysymykset

LIITE 1.

1. Voiko PIMA-kohteen pohjavettä tai pilaantunutta pohjavettä hyödyntää lämmön talteenotossa?
2. Mitä tulee ottaa huomioon veden pumppausta ja takaisin injektointia suunniteltaessa. Miten varmistetaan, ettei lämmin- ja kylmäpuoli pääse sekoittumaan keskenään?
3. Miten urbaanien alueiden vaikutus ilmenee pohjavesissä, entä vuoden-aikakohtaiset vaihtelut?
4. Paljonko pumppauskaivon investointikustannukset ovat?
5. Miten selvitetään, että pumppauskaivon antoisuus on riittävä mitoitettavalle lämmitys-/jäähdytysjärjestelmälle?
6. Onko pohjavesien lämpötiloissa havaittavissa muutosta (viilenemistä), kun nykyisin talvikaudella eristävän lumipeitteen määrä on ollut vähenevän päin ja välillä sitä ei ole ollenkaan pahimmilla pakkasilla?
7. Olen käynyt läpi erilaisia tutkimustuloksia liittyen lämpötilan muutoksen vaikutuksesta pohjaveden laatuun ja heräsi kysymyksiä aiheeseen liittyen. Esimerkiksi Journal of Water and Climate Change -julkaisun artikkelissa "Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production (2013)" on esitetty tutkimustuloksia testilämpötiloille 5°C, 11°C, 25°C ja 60°C. Lämpötilassa 25°C vaikutukset ovat olleet muuten vähäisiä, mutta arseenin kohdalla on havaittu selvästi koho-neita pitoisuuksia (juomaveden raja-arvo 10 µg/L ylitetty) ja lisääntyntä mobilisaatiota. Lämpötilassa 60°C havaittiin selviä muutoksia pH:ssa sekä DOC-, P-, K-, Si-, As-, Mo-, V-, B-, ja F -pitoisuuksissa. Onko tällainen huomioitava esimerkiksi ympäristövaikutusten arvioinnissa vai onko vaikutukset vain vähäisiä? Monitoroidaanko toiminnan aikana mahdollisia muutoksia pohjavedessä?